





# Projet ARAI 3 : Aménagements et ouvrages côtiers polynésiens – incidence sur l'aléa submersion et impacts environnementaux

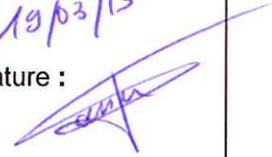
Rapport final

BRGM/RP-61656-FR  
Février 2013

Étude réalisée dans le cadre des projets de Service public du BRGM 2012

**M. Garcin**  
Avec la collaboration de  
**S.Lecacheux**

|  |
|--|
| <p><b>Vérificateur :</b></p> <p>Nom : O. Sedan-Miegemolle</p> <p>Date : 14/03/2013</p> <p>Signature :</p>  |
|--|

|   |
|---|
| <p><b>Approbateur :</b></p> <p>Nom : Evelyne Foerster</p> <p>Date : 19/03/13</p> <p>Signature :</p>  |
|---|

En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique, l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2008.



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

**Mots clés** : Littoral, Polynésie, aléa, submersion marine, ouvrage, aménagement, cyclone, ARAI.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

**Garcin M.** (2013). Projet ARAI 3 : Aménagements et ouvrages côtiers polynésiens – incidence sur l'aléa submersion et impacts environnementaux. Rapport BRGM/RP-61656-FR, 65 p., 45 fig., 4 tab.

## Synthèse

Afin d'appuyer les réflexions engagées par le service de l'urbanisme de la Polynésie Française sur la problématique littorale, le BRGM a proposé une série d'actions dans le projet ARAI3 visant à disposer de nouveaux moyens pour optimiser la gestion du risque de submersion marine. Dans ce cadre, une réflexion sur les mesures de protection des parcelles en bordure de littoral a été menée. Ce rapport propose une synthèse et une analyse de l'efficacité et des impacts environnementaux des ouvrages, des aménagements et des stratégies alternatives de gestion du risque de submersion marine en Polynésie Française et dans le monde.

Cette analyse s'appuie sur une typologie des côtes des îles hautes face à la submersion marine. La classification a été effectuée par rapport à l'exposition aux vagues en intégrant la susceptibilité face au *wave-setup*. Elle a permis de différencier 7 types regroupés en deux familles à partir de critères géomorphologiques (côtes exposées « E » aux vagues et côtes protégées des vagues « P »).

Les ouvrages et aménagements existants en Polynésie Française ont été recensés et classés en fonction de leur dimensionnement et de leur position sur le profil de côte (petits-fonds, bas de plage, haut de plage et arrière-plage). Il a été mis en évidence qu'il n'existe quasiment pas d'ouvrage spécifiquement édifié et dimensionné pour lutter efficacement contre la submersion marine. En effet, il s'agit le plus souvent d'aménagements très variés tant sur leur forme, leurs matériaux, leur statut (privé ou public) que leurs objectifs. En fonction de leurs positions sur le profil, ils peuvent avoir des effets néfastes et variés sur les processus sédimentaires et contribuent souvent à dégrader le littoral ainsi que les écosystèmes du lagon.

Les approches et stratégies alternatives de gestion du risque, mises en œuvre ou envisagées dans plusieurs pays, sont également évoquées. Elles sont généralement une réponse aux dysfonctionnements et inconvénients des stratégies « *tout ouvrage* » qui avaient été élaborées auparavant. Elles visent en général à diminuer l'exposition des enjeux et des populations aux aléas par la mise en place d'un cadre réglementaire plus strict ou encore à encourager la réalisation de constructions résilientes à l'aléa et peu néfastes pour le milieu environnant.

Avec les informations produites dans ce rapport, des configurations types (profils de côte et aménagements types) ont été déterminées afin de tester l'efficacité et la viabilité de certains aménagements individuels contre la submersion marine à partir de modélisations numériques 1D. Ce travail fait l'objet d'un rapport indépendant (Lecacheux et al., 2013).



# Sommaire

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. INTRODUCTION ET OBJECTIFS .....</b>   | <b>9</b>  |
| 1.1. CONTEXTE ET OBJECTIFS.....   | 9         |
| 1.2. LES PHENOMENES A L'ORIGINE DE LA SUBMERSION MARINE .....                                     | 10        |
| <b>2. TYPOLOGIE DES COTES DES ILES HAUTES POLYNESIENNES FACE A LA SUBMERSION.....</b>             | <b>11</b> |
| 2.1 TYPE 1 : COTES EXPOSEES AUX VAGUES .....  | 11        |
| 2.1.1 Type E 1 : Sans protection (côte ouverte).....  | 11        |
| 2.1.2 Type E 2 : Dans l'axe d'une passe .....   | 11        |
| 2.2 TYPE 2 : COTES PROTEGEES DES VAGUES.....  | 12        |
| 2.2.1 Type P1 & P2 : Avec récif frangeant.....  | 12        |
| 2.2.2 Type P3 : Avec récif barrière sans récif frangeant .....                                    | 12        |
| 2.2.3 Type P4 & P5 : Avec récif barrière et récif frangeant .....                                 | 12        |
| <b>3. LES OUVRAGES ET AMENAGEMENTS DE PROTECTION CONTRE LA MER..</b>                              | <b>15</b> |
| 3.1 LES OUVRAGES ET AMENAGEMENTS EXISTANT EN POLYNESIE .....                                      | 15        |
| 3.1.1 Les ouvrages.....   | 18        |
| 3.1.1.1 Ouvrages de petit fond et de bas de plage.....  | 18        |
| 3.1.1.2 Le cas des remblais routiers.....   | 19        |
| 3.1.2 Les aménagements.....   | 23        |
| 3.1.2.1 Aménagements de petits fonds et de bas de plage .....                                     | 23        |
| 3.1.2.2 Aménagements de haut de plage.....  | 32        |
| 3.1.2.3 Aménagements en arrière-plage, arrière littoral .....                                     | 34        |
| 3.1.3 Le problème de la dégradation (entretien) des aménagements et des ouvrages polynésiens..... | 35        |
| 3.2 QUELQUES APPROCHES DE PROTECTION CONTRE LES SUBMERSIONS MARINES DANS LE MONDE .....           | 40        |
| 3.2.1 Ouvrages de protection .....  | 40        |
| 3.2.1.1 Les brise-lames.....  | 40        |
| 3.2.1.2 Les pieux hydrauliques .....  | 40        |
| 3.2.1.3 Les atténuateurs de houle .....   | 41        |
| 3.2.1.4 Les digues anti-submersion.....   | 41        |

|   |           |
|---|-----------|
| 3.2.1.5 Les petits ouvrages.....  | 45        |
| 3.2.1.1 Le rechargement de plage.....   | 49        |
| 3.2.2 Stratégies alternatives .....   | 50        |
| 3.2.2.1 La stratégie de diminution des risques côtiers à Hawaii .....                               | 50        |
| 3.2.2.2 Le Plan Submersions Rapides .....   | 52        |
| 3.2.2.3 Exemple de développement de bâtiments résilients .....                                      | 53        |
| 3.3 SYNTHÈSE .....  | 56        |
| <b>4. CONCLUSIONS.....</b>  | <b>59</b> |
| 4.1. TYPOLOGIE DES CÔTES ET MESURES DE PROTECTION EXISTANTES EN POLYNÉSIE ET<br>DANS LE MONDE ..... | 59        |
| 4.2. TESTS SUR L'EFFICACITÉ DES OUVRAGES DE PROTECTION .....  | 61        |
| <b>5. BIBLIOGRAPHIE.....</b>  | <b>63</b> |

## Liste des illustrations

|   |    |
|---|----|
| Figure 1 : Schéma des côtes des îles hautes polynésiennes en fonction de leur exposition à la submersion marine   | 13 |
| Figure 2 : Localisation des aménagements sur le profil de plage, impacts et niveau d'exposition à l'aléa submersion marine (sans échelle)   | 17 |
| Figure 3: Structure portuaire maçonnée établie sur remblai ; Papeete (Ph. C. Chene)   | 18 |
| Figure 4 : Epis à Moorea (Haut : Vue d'ensemble A.Aureli 2001, en bas Image GeoEye 2012.  | 19 |
| Figure 5 : Littoral aménagé avec route sur remblai et enrochements en petits fonds (Huahine, M. Garcin 2005)  | 21 |
| Figure 6 : Route sur remblai dans des zones de petits fonds longueur 500 m (Raïatea Sud, 2005, 2004 DigiGlobe)  | 21 |
| Figure 7: Route en remblai avec armature en enrochement (Tahaa) séparant le littoral de sa mangrove (M. Garcin 2005)  | 22 |
| Figure 8 :Route sur remblai dans une zone de petits fonds (Tahiti, Teva i uta)  | 22 |
| Figure 9 : Enrochement, remblai et route en haut de plage. Accumulation de galets (tirets jaunes) contre les enrochements protégeant la route dans le secteur de Vairao, lors d'une houle de 3-4 m de direction S-SW (Des Garets 2005).Ce prisme favorise le franchissement de l'ouvrage (symbolisé par la flèche bleue). | 23 |
| Figure 10 : Création de chenaux par dragage pouvant favoriser localement la propagation de la houle vers la côte (flèches orange, chenal 1) ou pouvant interrompre les processus de transfert sédimentaire cross-shore (chenal 2, Moorea, Image GeoEye 2012)  | 24 |
| Figure 11 :Cale d'accès au lagon entourée par des murs maçonnés (Papeete, Ph. C.Chene). La flèche bleue indique l'axe de pénétration potentielle de la mer sous l'effet de la surcote et des vagues   | 25 |
| Figure 12 : Cale d'accès au lagon au premier plan, aménagements privés au second plan (mur et remblais), structures portuaires et industrielles à l'arrière plan (Papeete, Ph. C. Chene) – Artificialisation totale du trait de côte  | 25 |
| Figure 13 : Pénétration de la mer par une cale d'accès à la plage (Bernières-sur-Mer, 28 Février 2010, DDRM Calvados 2012)  | 26 |
| Figure 14 :Haut mur de bas de plage en enrochement cimenté avec balustrade, escalier et remblai (Commune de Paea, Ph . C. Chene)  | 26 |
| Figure 15 : Petits enrochements de faible altitude avec promenade et muret sur remblai (Commune d'Arue, ph. C. Chene) La dégradation du muret est à noter   | 27 |
| Figure 16 :Enrochements de grande ampleur et remblai en zone urbaine en zone de petit fond (Toa'Ta, Papeete, Ph. C. Chene)  | 27 |
| Figure 17 : Aménagement littoral public de petit fond en mur béton et remblai (Huahine 2006, Ph. M. Garcin) A noter les affouillements du remblai en arrière du mur en béton  | 28 |
| Figure 18 :Succession continue en petit fond de murs en béton avec remblai et enjeux en arrière (Pirae, Ph. C. Chene)   | 29 |
| Figure 19 : Aménagement privé d'un mur en béton avec remblai sur petit fond (Commune d'Arue, ph. C. Chene)  | 29 |
| Figure 20 :Important remblais effectué sur le récif frangeant du Sud de Raïatea. Cet aménagement avance de 475m dans le lagon par rapport au littoral ; haut : image DigiGlobe, la flèche indique l'axe de vue de la photo du bas (M.Garcin 2005)   | 31 |
| Figure 21 :Murs de bas de plage en enrochement cimenté (premier plan), non cimenté (second plan) (Commune d'Arue, plage publique, Ph. C. Chene)   | 32 |
| Figure 22 : Mur en enrochement de haut de plage avec remblai et enjeux en arrière (Commune d'Arue Plage Lafayette, photo C. Chene)  | 33 |
| Figure 23 : Enrochement incliné et fortement dégradé de haut de plage (photo C. Chene)  | 33 |
| Figure 24 : Aménagement privé, mur en béton et haut de plage et remblai (Commune d'Arue Aire de loisir Vaipoopoo, photo C. Chene)   | 34 |

|   |    |
|---|----|
| Figure 25 : Mur avec palissade en haut de plage sans remblai (ou faible épaisseur de remblai ; Arue, Commune d'Arue Aire de loisir Vaipoopoo, photo C. Chene)   | 34 |
| Figure 26 :Création de remblais dans des zones inondables littorales (Raïatea 2005, Ph. M.Garcin)   | 35 |
| Figure 27 :Exemple de dégradation et déchaussement d'aménagements par attaque de vague et érosion en haut de plage. Le manque d'entretien des aménagements compromet fortement leurs fonctions (Commune d' Arue, plage Lafayette, ph. C. Chene) | 37 |
| Figure 28 :Dégradation dans un mur de haut de plage maçonné par attaque directe des vagues (Papara, Ph. C. Chene)   | 38 |
| Figure 29 : Affouillement et érosion des remblais situés en arrière des enrochements par déferlement au-dessus de l'ouvrage (Parara, face à la passe de Rairoa, Ph. C. Chene)   | 38 |
| Figure 30 :Très forte dégradation d'un muret en béton et affouillement des terrains en arrière de l'ouvrage (Pirae)   | 39 |
| Figure 31 : Très forte dégradation d'un mur béton en haut de plage (Pirae, Ph. C. Chene)  | 39 |
| Figure 32 :Dégradation et déchaussement en haut de plage de la base d'un mur par érosion de la plage  | 40 |
| Figure 33 : Coupe de principe de l'atténuateur d'un atténuateur de houle (Koffler et al. 2009)  | 41 |
| Figure 34 :Brèches dans les digues suite au passage de la tempête Xynthia (2010) : brèche dans la digue marine du Marais de Guérande (haut), destruction d'une digue sur l'île de Ré (bas)  | 43 |
| Figure 35 : Brèches et fortes dégradations de la digue de l'Aiguillon lors de la tempête Xynthia (2010)   | 44 |
| Figure 36 :Batardeau en planche de bois installé pour contenir une crue du Rhône au début du XXème siècle (Archives Municipales d'Avignon)  | 45 |
| Figure 37 : Batardeau moderne (aluminium) installé en haut de plage suite à la tempête Xynthia (Châtelailon, Sud-Ouest)   | 46 |
| Figure 38 : Réhaussement de muret et ajout d'une seconde ligne de murets suite à Xynthia (Andernos-les-Bains, Photo Observatoire de la Côte Aquitaine)  | 47 |
| Figure 39 :Réhausse de muret et fermeture provisoire d'accès à la plage par batardeau (Andernos-les-Bains, Photo Observatoire de la Côte Aquitaine)   | 47 |
| Figure 40 : Installation de porte étanche suite à Xynthia (Andernos-les-Bains, , Photo Observatoire de la Côte Aquitaine)   | 48 |
| Figure 41 : Buse d'évacuation équipé d'un clapet anti-retour coté océan à Andernos-les-Bains (Photo Observatoire de la Côte Aquitaine)  | 48 |
| Figure 42 : Fonctionnement du système de protection contre la submersion marine pendant une tempête d'hiver à Andernos-les-Bains (Décembre 2011, photo. Observatoire de la Côte Aquitaine)  | 49 |
| Figure 43 : Maison traditionnelle sur pilotis dans une zone inondable de Raïatea (Gauche, Photo. M. Garcin) . Maison moderne sur pilotis à Hawaii prenant en compte une forte hauteur de submersion (Photo Dolan Eversole)                      | 54 |
| Figure 44 :Maison amphibie sur la rivière Mass (Pays-Bas, Photo. Bas Czerwinski)  | 55 |
| Figure 45 : Maison bateau à proximité d'Amsterdam (Pays-Bas, Photo. Margriet Faber)   | 55 |
| <br>  |    |
| Tableau 1 : Typologie des côtes des îles hautes polynésiennes en fonction de leur exposition à la submersion marine (nc : non concerné)   | 14 |
| Tableau 2 : Caractéristiques distinctives entre les ouvrages et les aménagements  | 15 |
| Tableau 3 : Tableau synthétique sur les différents types d'ouvrages ayant un rôle vis-à-vis de la submersion marine   | 57 |
| Tableau 4. Synthèse des résultats sur les tests d'efficacité des ouvrages de protection (Lecacheux et al., 2013)  | 62 |

# 1. Introduction et objectifs

## 1.1. CONTEXTE ET OBJECTIFS

Dans le cadre du contrat de développement Etat-Polynésie 2000-2006, le BRGM s'est vu confier la réalisation d'un bilan général des connaissances sur les risques naturels et l'élaboration de Plans de Prévention des Risques (PPR) sur les 48 communes de la Polynésie française. Le premier programme ARAI (Aléas, Risques naturels, Aménagement et Information) a notamment donné lieu à une cartographie de l'aléa submersion marine lié aux houles cycloniques. Depuis, le BRGM a poursuivi ces travaux en collaboration avec le service de l'urbanisme dans le cadre des projets ARAI 2 (2008-2010) et ARAI 3 (2010-2012), qui ont proposé des améliorations successives pour l'évaluation et la cartographie des risques.

Pour appuyer la réflexion engagée par le service de l'urbanisme polynésien sur la problématique littorale, le BRGM a proposé, dans le cadre du projet ARAI3, deux actions visant à disposer de nouveaux moyens pour optimiser la gestion du risque de submersion marine :

- La première concerne une réévaluation des scénarios de référence de manière probabiliste, permettant de proposer des niveaux d'aléa plus réalistes que lors du premier programme ARAI (basé sur des scénarios déterministes). Des modélisations 2D de la submersion à partir de ces scénarios sont également prévues sur un certain nombre de sites à enjeux.
- La seconde consiste à analyser les conditions dans lesquelles des aménagements réduisant le risque à un niveau acceptable peuvent être envisageables. Elle comprend (1) une analyse sur les mesures de protection existantes en Polynésie Française et dans le monde et (2) des tests sur l'efficacité et la viabilité de certains aménagements avec des modélisations numériques 1D sur différents profils types pour trois scénarios de référence (correspondant au scénario centennal calculé pour différentes façade des îles de Tahiti et Moorea).

Ces travaux font l'objet de deux rapports indépendants. Le rapport de Lecacheux et al. (2013) contient (1) la réévaluation des scénarios de référence (2) les modélisations 2D de la submersion sur les sites à enjeux et (3) les modélisations 1D sur l'efficacité et la viabilité des ouvrages sur les configurations types. L'objet de ce rapport est de :

- faire une typologie des côtes des îles hautes polynésiennes en fonction de leur exposition face à la submersion marine,
- faire un inventaire des types d'aménagements et ouvrages côtiers polynésiens susceptibles de jouer un rôle par rapport à l'aléa submersion marine,
- évaluer qualitativement l'impact de ces ouvrages et aménagements sur la réduction de l'aléa submersion mais également sur l'environnement,
- faire un tour d'horizon des types d'ouvrages anti-submersion marine édifiés ailleurs qu'en Polynésie Française,
- analyser quelques exemples de stratégies alternatives de gestion du risque submersion marine mises en œuvre.

- apporter des éléments afin de définir les configurations types (type de profil de côte et type d'ouvrage) qui feront l'objet de modélisations 1D.

## 1.2. LES PHENOMENES A L'ORIGINE DE LA SUBMERSION MARINE

Les mécanismes à l'origine de la submersion marine sont aujourd'hui bien connus. L'arrivée d'un important système dépressionnaire s'accompagne d'une élévation du niveau marin selon trois principaux processus (Pedreros & Garcin 2012) :

- ✓ la chute de pression atmosphérique entraîne une surélévation du niveau du plan d'eau. C'est le phénomène de baromètre inverse. Une diminution d'1hPa équivaut approximativement à une élévation d'1cm du plan d'eau ;
- ✓ le vent exerce une contrainte à la surface de l'eau générant une modification du plan d'eau (surcote ou décote) et des courants;
- ✓ les vagues générées par la tempête déferlent à l'approche des côtes. Elles transfèrent alors leur énergie sur la colonne d'eau, ce qui provoque une surélévation moyenne du niveau de la mer (le « *wave setup* » ou surcote liée aux vagues) pouvant s'élever à plusieurs dizaines de centimètres.

On appelle « surcote atmosphérique » l'élévation du niveau d'eau engendrée par les deux premiers mécanismes. Le niveau moyen de la mer lors d'une tempête résulte de l'ensemble de ces contributions avec celle de la marée. Pour obtenir le niveau maximal atteint par la mer, il faut aussi tenir compte du jet de rive (*swash*), c'est-à-dire le flux et le reflux des vagues. On appelle *Run-up* l'altitude maximale atteinte par le jet de rive (Pedreros & Garcin 2012).

Ces différents phénomènes peuvent provoquer des submersions marines. L'aléa submersion marine va être lié aux morphologies sous-marines et terrestres de la côte et au niveau d'intensité des facteurs de forçage vagues et surcote. Ceux-ci sont induits par les vents et les pressions atmosphériques susceptibles de s'observer sur la zone considérée.

Lors d'une tempête, d'une dépression tropicale ou d'un cyclone, les vagues et les surcotes générées sont susceptibles de produire des invasions temporaires de la mer dans les terres. Ces submersions marines peuvent se produire selon plusieurs modes ou processus qui sont respectivement :

- par débordement lorsque le niveau de la mer est supérieur à celui des terres,
- par surverse généralisée au-dessus d'ouvrages lorsque le niveau de la mer est supérieur à celui d'un ouvrage tel qu'une digue par exemple,
- par franchissement de paquets de vagues au-dessus des ouvrages lorsque le niveau de la mer est inférieur à celui de l'ouvrage mais que les vagues le dépassent lors de leur déferlement,
- par pénétration de la mer suite à la formation d'une brèche dans les terrains naturels (exemple des brèches dans les cordons dunaires) ou dans des ouvrages (brèches dans les digues et levées),

En outre, l'action des vagues peut contribuer à l'érosion de la côte, par exemple par arrachement de matériel sableux aux plages et aux cordons dunaires. Cette érosion peut en retour modifier la vulnérabilité de la côte à la submersion marine en modifiant les caractéristiques géomorphologiques de celle-ci.

## 2. Typologie des côtes des îles hautes polynésiennes face à la submersion

La détermination d'une typologie côtière a pour objectif de dégager les facteurs d'exposition à la submersion marine (débordements, franchissements par paquets de mer, etc.) afin d'étayer la réflexion sur les aménagements les plus pertinents à envisager pour réduire l'aléa submersion marine et de définir les configurations qui feront l'objet de modélisations 1D (cf. 4.2).

La classification des types de côte des îles hautes proposée est donc bâtie sur des critères qualitatifs permettant de définir l'exposition d'un segment à la submersion marine. Cette typologie prend en compte les facteurs vagues et *setup*. Ces critères sont basés sur la morphologie qualitative de la côte et de l'avant côte selon le profil cross-shore (c'est-à-dire perpendiculaire à la côte) et tout autre paramètre naturel influençant cette exposition à la submersion. Les valeurs des pentes des tombants récifaux et des plages ainsi que les largeurs de lagon qui sont des paramètres pouvant jouer sur l'exposition à l'aléa submersion marine ne sont pas intégrées. Cette classification est établie à facteurs de forçage équivalents, c'est à dire sans prendre en compte ni l'orientation du segment, ni le climat de vagues local (Figure 1). Cette typologie est donc basée sur des critères morphologiques purement qualitatifs qui permettent de se faire rapidement une idée du niveau d'exposition à l'aléa ainsi que des grandes caractéristiques de l'aléa (exposition aux vagues, au *setup* ou au deux) pour un type de côte donné. Rappelons enfin que les aménagements anthropiques ne sont ici pas pris en compte dans cette typologie, mais que pour un type identique et à condition de forçage équivalente, ils contribuent à modifier le niveau d'aléa.

Nous présentons ci-dessous (Tableau 1) les différents types du plus exposé au moins exposé aux vagues. Nous y avons distingué deux familles : les côtes exposées aux vagues (de type « E ») et les côtes protégées (de type « P »).

### 2.1 TYPE 1 : COTES EXPOSEES AUX VAGUES

#### 2.1.1 Type E 1 : Sans protection (côte ouverte)

Le profil cross-shore du segment de côte ne présente pas de récif barrière vers le large ni de récif frangeant. Il est donc directement exposé aux houles du large, le *setup* augmente essentiellement dans la zone d'avant plage et de plage.

#### 2.1.2 Type E 2 : Dans l'axe d'une passe

La côte environnant le segment possède un récif barrière, mais le segment de côte considéré est dans l'axe d'une passe et il n'y a pas de récif frangeant. Dans ce cas, le segment est directement exposé à certaines directions de houles. Pour d'autres directions de houle par contre, il peut être partiellement ou totalement protégé. Le *setup* augmente essentiellement dans la zone d'avant plage et de plage.

## 2.2 TYPE 2 : COTES PROTEGEES DES VAGUES

### 2.2.1 Type P1 & P2 : Avec récif frangeant

Dans ce type, le profil cross-shore présente un récif frangeant accolé au segment côtier. Nous distinguons deux sous-types :

- **Type P1** : Celui où il n'y a pas de récif barrière au large. Le segment de côte est relativement protégé par ce récif frangeant sur lequel les houles du large viennent se briser. Le facteur conditionnant l'exposition dans ce type de côte est la largeur du platier du récif frangeant ; plus il est large, plus la côte est protégée. Le setup augmente à partir de la zone de déferlement à l'aplomb du front récifal et reste élevé sur tout le platier et la zone de plage.
- **Type P2** : Celui où il y a un récif barrière pour lequel le segment considéré est dans l'axe d'une passe. Dans ce cas, les facteurs conditionnant l'exposition de la côte sont la direction des houles par rapport à l'axe de la passe et la largeur du récif frangeant. Le setup augmente à partir de la zone de déferlement à l'aplomb du front récifal et reste élevé sur tout le platier et la zone de plage comme pour le type P1.

### 2.2.2 Type P3 : Avec récif barrière sans récif frangeant

Le profil cross shore du segment montre la présence d'un récif barrière au large assurant le déferlement des houles du large et d'un lagon. La largeur du lagon (qui conditionne également la distance sur laquelle le vent souffle) conditionnera la formation d'une mer du vent ; plus le lagon sera large, plus le clapot sera formé. Le segment de côte sera d'autant plus exposé aux vagues que le lagon sera large. Le setup augmente à partir de la zone de déferlement à l'aplomb du front du récif barrière et reste assez élevé sur tout le lagon. Il y a à nouveau une remontée du setup au niveau du déferlement d'avant plage. Le setup est aussi largement conditionné par l'ensachage du lagon.

### 2.2.3 Type P4 & P5 : Avec récif barrière et récif frangeant

Le profil cross-shore du segment montre un récif barrière, un lagon plus ou moins profond et large, puis un récif frangeant accolé au segment. La protection du segment est assurée par le récif barrière sur lequel les houles viennent déferler et ne peuvent donc atteindre directement la côte. La largeur du lagon (*fetch*) va déterminer la mer du vent, plus le lagon sera large plus la mer du vent pourra former un clapot important. Le récif frangeant assurera la protection de la côte contre le clapot issu de la mer du vent

Le setup augmente à partir de la zone de déferlement à l'aplomb du front du récif barrière et reste assez élevé sur tout le lagon. Il y a à nouveau une remontée du setup au niveau du déferlement de l'avant récif frangeant, le setup reste ensuite élevé sur tout son platier. Le setup est aussi largement conditionné par l'ensachage du lagon.

On distingue dans ce type deux sous-types :

- **Type P4** : sans chenal profond,
- **Type P5** : avec chenal profond en travers du lagon.

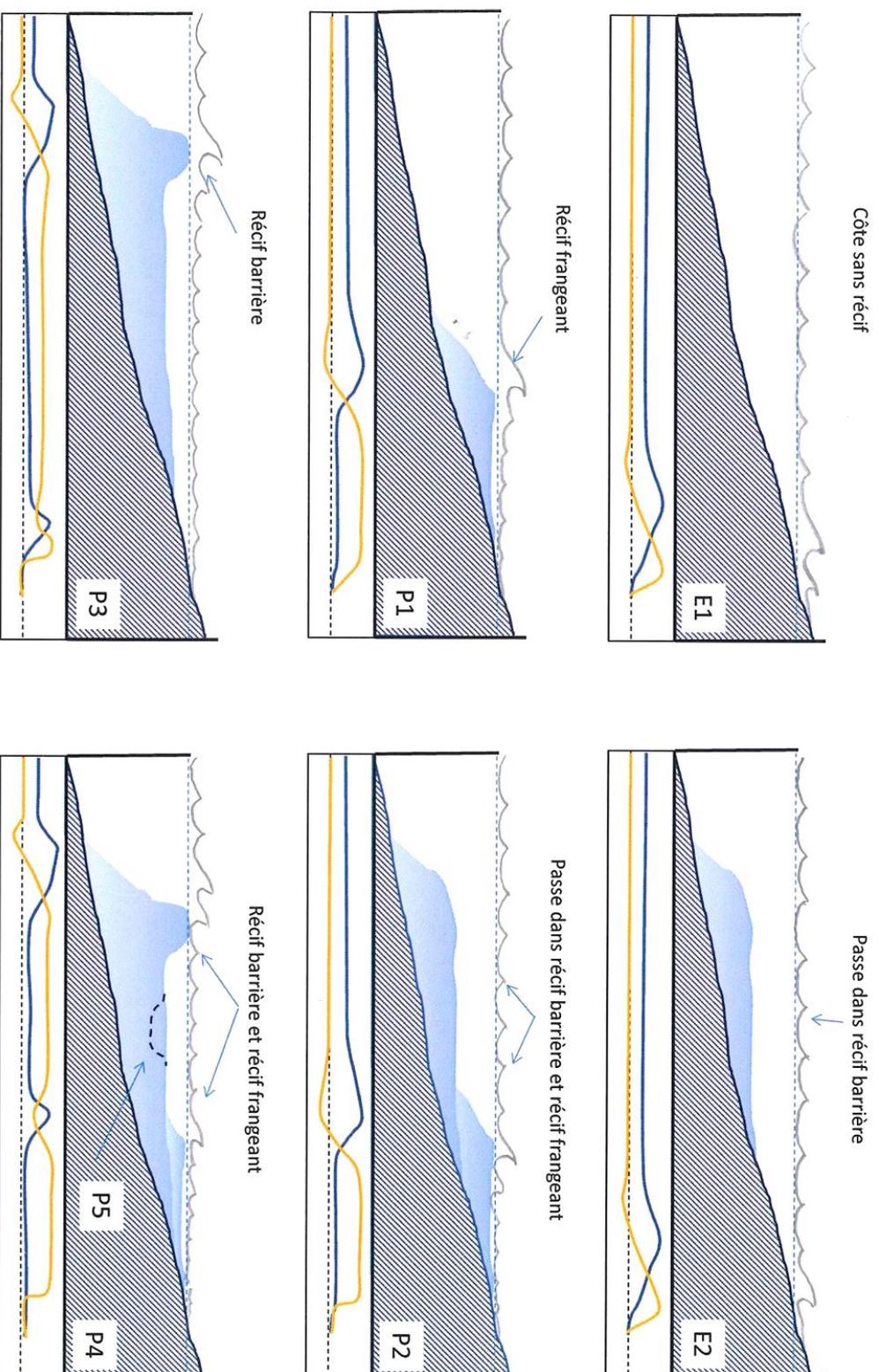


Figure 1 : Schéma des côtes des îles hautes polynésiennes en fonction de leur exposition à la submersion marine  
La courbe bleue représente la hauteur des vagues (sans dimension) et la courbe orange la valeur du wave setup (sans dimension)

| Type                        | Sous type | Récif barrière |        | Récif frangeant | Niveau qualitatif d'exposition à l'énergie des vagues | Commentaires  |
|-----------------------------|-----------|----------------|--------|-----------------|---|---|
|                             |           | Passé          | Chenal |                 |   |   |
| Type 1 : Côte exposée (E*)  | E1        | Non            | nc     | nc              | Très forte  | Propagation des houles jusqu'à la côte; setup à partir de l'avant plage   |
|                             | E2        | Oui            | Oui    | Non             | Forte   | Propagation des houles jusqu'à la côte en fonction de leur direction ; setup à partir de l'avant plage  |
|                             | P1        | Non            | nc     | nc              | Moyenne à forte                                       | Houle déferle sur le récif frangeant; setup dès le déferlement sur le frangeant et sur tout le platier  |
|                             | P2        | Oui            | Oui    | Non             | Moyenne à forte                                       | Houle se propageant par la passe jusqu'au frangeant dans certaines conditions ; setup dès le déferlement sur le frangeant et sur tout le platier, rôle de l'ensachage dans l'élévation du plan d'eau  |
|                             | P3        | Oui            | Non    | Non             | Faible  | Houles se brisant sur le récif barrière, mer du vent à la côte; setup à partir du déferlement sur la barrière et dans le lagon, 2ème setup lors du déferlement d'avant plage, rôle de l'ensachage dans l'élévation du plan d'eau  |
| Type 2 : Côte protégée (P*) | P4        | Oui            | Non    | Non             | Faible  | Houle se brisant sur le récif barrière, mer du vent déferlant sur le frangeant; setup à partir du déferlement sur la barrière et dans le lagon, 2ème setup dès le déferlement sur le récif frangeant jusqu'à la plage, rôle de l'ensachage dans l'élévation du plan d'eau |
|                             | P5        | Oui            | Non    | Oui             | Faible  | Houle se brisant sur le récif barrière, mer du vent déferlant sur le frangeant; setup à partir du déferlement sur la barrière et dans le lagon, 2ème setup dès le déferlement sur le récif frangeant jusqu'à la plage, rôle de l'ensachage dans l'élévation du plan d'eau |

Tableau 1 : Typologie des côtes des îles hautes polynésiennes en fonction de leur exposition à la submersion marine (nc : non concerné)

### 3. Les ouvrages et aménagements de protection contre la Mer

#### 3.1 LES OUVRAGES ET AMENAGEMENTS EXISTANT EN POLYNESIE

Les ouvrages et aménagements présents sur le domaine côtier des îles hautes polynésiennes sont très variés tant par leurs formes, leur mise en œuvre que par les matériaux utilisés. Ces ouvrages et aménagements résultent dans certains cas d'une initiative publique (aéroport, digues portuaires, promenade de bord de mer etc..) mais le plus souvent sont issus d'initiatives privées (enrochement de front de mer, mur de séparation...).

Les objectifs assignés à ces ouvrages et aménagements sont généralement plus orientés vers la défense contre l'érosion côtière et le gain d'espace sur le domaine littoral ; leur rôle de protection contre la submersion marine semble être comme secondaire. De ce fait, ces ouvrages n'ont donc pas nécessairement été dimensionnés pour répondre à un événement de submersion marine d'ampleur définie au préalable.

Afin d'essayer de clarifier notre approche, nous distinguons les ouvrages qui résultent d'une initiative publique et qui sont généralement d'une taille significative et correspondent à l'expression de la réponse à un besoin de la société, des aménagements qui sont généralement d'ampleur spatiale plus limitée et ne prennent pas nécessairement en compte les incidences possibles sur les segments côtiers adjacents.

| Type               | Réalisation  | Origine  | Etendue                                       |
|--------------------|--|--|---|
| <b>Ouvrage</b>     | Unité structurelle, conception adaptée au besoin initial | Initiative publique pour répondre à un besoin spécifique identifié | Etendue spatiale généralement plus importante |
| <b>Aménagement</b> | Hétérogénéité de proche en proche                        | Initiative publique ou privée                                      | Etendue spatiale plus restreinte              |

Tableau 2 : Caractéristiques distinctives entre les ouvrages et les aménagements

Compte-tenu de la diversité des ouvrages et des aménagements côtiers des îles hautes de la Polynésie, une typologie nous paraît utile. Les variétés des objectifs assignés à ces ouvrages et aménagements, de leurs formes, de leurs natures et de leurs constituants permettraient d'envisager la réalisation de différentes typologies selon ces différents critères. Toutefois, les objectifs du projet Arai 3 étant clairement d'envisager le rôle qu'ont ces ouvrages et aménagements sur l'aléa submersion marine, il nous a paru plus opportun de baser la typologie à un premier niveau sur la distinction ouvrage / aménagement ; puis à un second niveau par leur position sur le profil cross-shore. En effet, la position de l'aménagement sur ce profil déterminera pro-parte le rôle qu'il peut

jouer dans l'aléa submersion (dissipation de l'énergie des vagues, rôle de barrière par rapport à la submersion, etc.). La Figure 2 présente synthétiquement l'influence de la position sur le profil cross-shore d'un aménagement type sur les aléas et sur la préservation du système côtier. Il en ressort qu'assez logiquement, plus l'aménagement ou l'ouvrage est bas dans le profil cross-shore, plus l'incidence sur la dynamique et l'intégrité côtière est forte, plus la résilience diminue et plus le niveau d'aléa augmente pour les enjeux/personnes.

Enfin, le troisième niveau concernera la nature et la structure de chaque aménagement.

La typologie proposée est donc hiérarchisée en plusieurs niveaux emboîtés :

- Famille (ouvrage OU aménagement)
  - o Ouvrage
    - Type d'ouvrage (digues, épis, remblais routier)
    - Position sur le profil cross-shore
  - o Aménagement
    - Type d'aménagement
      - Position sur le profil cross-shore
        - o Mode de construction

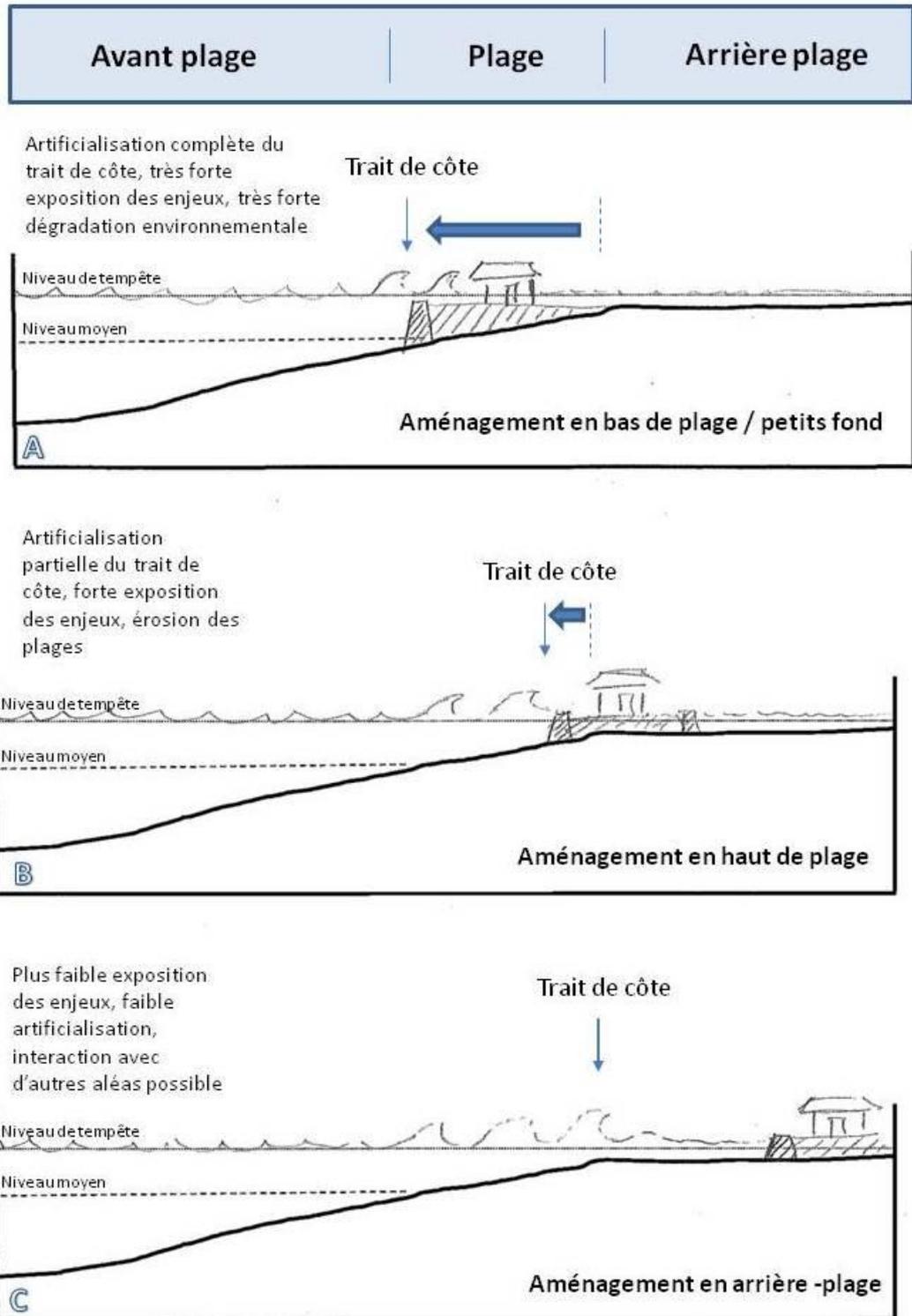


Figure 2 : Localisation des aménagements sur le profil de plage, impacts et niveau d'exposition à l'aléa submersion marine (sans échelle)

### 3.1.1 Les ouvrages

#### 3.1.1.1 *Ouvrages de petit fond et de bas de plage*

- **Digues et structures portuaires**

Les digues et structures portuaires (quais, cales etc.) sont des ouvrages qui n'ont pas pour objectif de protéger de la submersion marine. Toutefois, leur édification joue un rôle important dans :

- la fixation du trait de côte et bien souvent l'élévation par rapport au terrain naturel,
- la modification de la morphologie initiale qui est souvent complètement modifiée, notamment par la réalisation de remblai avant le bétonnage, du creusement de chenaux pour l'accès des bateaux etc.,
- dans la courantologie locale et les modalités des propagations des houles,
- dans les échanges sédimentaires cross-shore (perpendiculairement au trait de côte) et long-shore (parallèlement au trait de côte).

Ainsi, toutes les conditions et les fonctionnements hydro-sédimentaires initiaux sont modifiés de façon significative, la dynamique des processus conduisant potentiellement à une submersion est radicalement modifiée. Rappelons toutefois que ces aménagements sont acquis la plupart du temps aux dépens du domaine maritime, et que leur présence favorise par essence l'implantation d'enjeux humains et économiques dans ces zones (environnement urbain en arrière : Papeete, Uturoa ...). Les hauteurs des digues et des quais ont été en général dimensionnées pour s'accommoder aux conditions locales (vagues et surcote). Il n'en reste pas moins que dans le cas de l'occurrence d'événements exceptionnels ou tout au moins supérieurs aux événements de référence pris en compte pour le dimensionnement des ouvrages, ceux-ci peuvent être submergés et qu'ils ne peuvent en aucun cas garantir une protection totale contre cet aléa.



Figure 3: Structure portuaire maçonnerie établie sur remblai ; Papeete (Ph. C. Chene)

- **Les épis**

Les épis sont relativement rares sur les côtes des îles hautes. L'exemple le plus couramment cité est celui de Moorea (Tipanier ; Figure 4) où des épis formés par des blocs ont été installés en vue de réduire l'érosion des plages. Leur rôle quant à la protection contre les submersions marines est indirect. En effet, dans les zones où ils sont installés, ils contribuent à stabiliser et engraisser la plage et l'avant plage permettant ainsi de garder un profil plus équilibré et une pente plus faible favorisant la dissipation de l'énergie des vagues lors des tempêtes. De plus, l'engraissement ou tout au moins la stabilisation de la plage permet de conserver une certaine distance entre la zone de déferlement et les enjeux. Les effets néfastes induits par les épis sont bien connus notamment le report des problèmes d'érosion sur les segments côtiers voisins qui reçoivent moins d'apport de sédiment par la dérive littorale. Ces segments se retrouvent ainsi avec un budget sédimentaire déficitaire provoquant leur érosion (Paskoff 1985, MEEDDM 2010).



Figure 4 : Epis à Moorea (Haut : Vue d'ensemble A.Aureli 2001, en bas Image GeoEye 2012).

### 3.1.1.2 **Le cas des remblais routiers**

Les routes territoriales sont fréquemment installées sur un remblai formant saillie par rapport au niveau du terrain naturel. Il permet de maintenir la chaussée hors d'eau en conditions météorologiques « normale ». La position de ces structures par rapport au profil cross-shore est variée en fonction des localisations, c'est pourquoi nous les traitons à part. En effet, Il est possible d'observer ce type de structure aussi bien dans des zones

de petits fonds (Figure 5, Figure 6), en bas de plage, en haut de plage mais aussi au sein d'une zone humide de type mangrove (Figure 7). De ce fait, bien que la constitution de ce remblai puisse être la même dans les trois cas, son rôle éventuel par rapport, d'une part à la dynamique hydro-sédimentaire et d'autre part par rapport à l'aléa submersion marine peut être variable. Le cas des remblais routiers n'est donc qu'un cas particulier des aménagements qui seront présentés ultérieurement, si ce n'est qu'ils résultent d'une démarche collective d'aménagement du territoire et que les enjeux qui y sont liés concernent l'ensemble de la communauté.

Ces remblais routiers sont souvent assis sur des zones basses formées par les plaines d'inondation des rivières et par des mangroves. Le remblai des routes joue dans ce cas un rôle de barrière empêchant ou freinant la pénétration de la mer en cas de surcote. Toutefois, ces structures ne sont pas dimensionnées spécifiquement contre les submersions marines et ne sont pas prévues pour subir les assauts des vagues. De ce fait, elles peuvent être rapidement endommagées, érodées voire bréchifiées et perdre ainsi leur fonction défensive. De plus, leur existence bloque les échanges sédimentaires ce qui diminue la capacité du segment à s'autoréguler. Enfin, ces remblais routiers ont assez souvent un effet néfaste pour l'évacuation des crues fluviales, celles-ci ne pouvant plus transiter qu'aux seuls ponts dont les sections sont souvent très réduites. Ceci aboutit à l'augmentation de la durée de l'inondation et à l'augmentation de la hauteur d'eau pour un même débit. De même, dans le cas où ces remblais seraient submergés lors d'une tempête, la durée de la submersion marine en arrière serait augmentée, le remblai jouant là encore le rôle de barrage à l'évacuation.

Dans d'autres cas, les routes sont construites à proximité immédiate du haut de plage avec souvent un mur de soutien réalisé en maçonnerie et en moellons (Figure 9). Bien qu'a priori ils puissent contenir les submersions de faible hauteur, ils restent néanmoins fragiles, leur endommagement conduisant assez rapidement à de nombreux dégâts induits en premier lieu sur la route. De surcroît, l'existence de ce muret en haut de plage peut favoriser le dépôt de galets en haut de plage qui viennent se plaquer sur le mur et former ainsi un prisme d'accumulation. Ce prisme peut assez rapidement constituer un tremplin qui favorisera ensuite la propagation des vagues sur et au-delà du mur et de la route (Figure 9).



Figure 5 : Littoral aménagé avec route sur remblai et enrochements en petits fonds (Huahine, M. Garcin 2005)



Figure 6 : Route sur remblai dans des zones de petits fonds longueur 500 m (Raïatea Sud, 2005, 2004 DigiGlobe)



*Figure 7: Route en remblai avec armature en enrochement (Tahaa) séparant le littoral de sa mangrove (M. Garcin 2005)*



*Figure 8 :Route sur remblai dans une zone de petits fonds (Tahiti, Teva i uta)*



Figure 9 : Enrochement, remblai et route en haut de plage. Accumulation de galets (tirets jaunes) contre les enrochements protégeant la route dans le secteur de Vairao, lors d'une houle de 3-4 m de direction S-SW (Des Garets 2005). Ce prisme favorise le franchissement de l'ouvrage (symbolisé par la flèche bleue).

### 3.1.2 Les aménagements

#### 3.1.2.1 Aménagements de petits fonds et de bas de plage

- **Dragage et chenalisation**

Pour faciliter l'accès des bateaux aux lagons, des chenaux ont parfois été réalisés dans le récif frangeant. Ces chenaux ont été créés, soit par écrêtage manuel des pâtes coralliennes présents sur le fond, soit creusés à la pelle mécanique sur une profondeur de 1 à 2 mètres (M. Porcher, 1995). Ces chenaux ont des largeurs variables comprises entre quelques mètres et plusieurs dizaines de mètres. Leur réalisation diminue localement la dissipation des vagues et des houles et en fonction de leur orientation peuvent même jouer le rôle de canal à houle, cela d'autant plus qu'ils sont parfois situés dans l'axe d'une passe (voir par exemple la Figure 10). Ces chenaux peuvent ainsi favoriser la propagation de la houle jusqu'à la côte et de ce fait augmenter localement l'aléa submersion sur cet axe. De surcroît, l'érosion des plages dans ces secteurs sera augmentée contribuant aussi à diminuer la résilience du littoral lors d'événements tempétueux. Les chenaux creusés parallèlement à la côte ont un impact essentiellement sur les échanges sédimentaires cross-shore en piégeant les sédiments lors de leur transit et donc en empêchant les rééquilibres sédimentaires entre l'avant plage et la plage. Ces processus auront tendance à fragiliser la plage qui, dans bon nombre de cas, sera affectée par une érosion plus forte qu'auparavant. Cette plus grande sensibilité à l'érosion de ces plages contribuera indirectement à l'augmentation locale de l'aléa submersion.

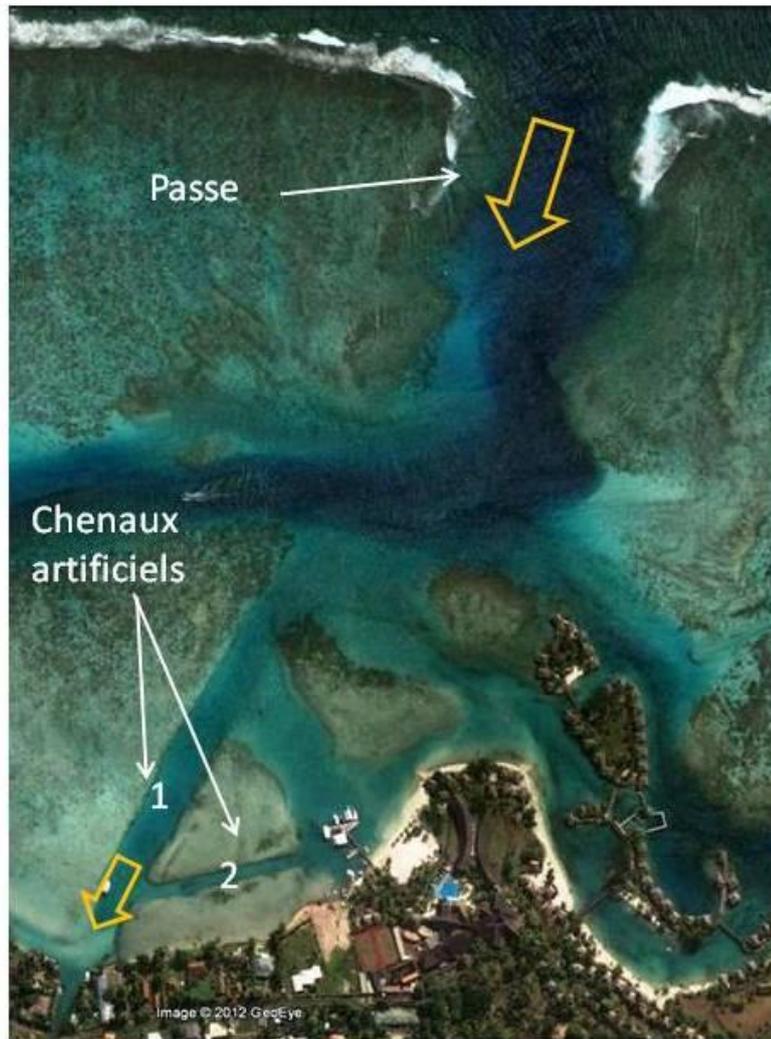


Figure 10 : Création de chenaux par dragage pouvant favoriser localement la propagation de la houle vers la côte (flèches orange, chenal 1) ou pouvant interrompre les processus de transfert sédimentaire cross-shore (chenal 2, Moorea, Image GeoEye 2012)

- **Slip et cale d'accès**

Les slips et cale d'accès bétonnées (Figure 11Figure 12) constituent de petits aménagements qui constituent des axes privilégiés de pénétration de la mer sous l'effet de la surcote et des vagues lors des tempêtes et des cyclones (Figure 13). Leur incidence est essentiellement locale mais leurs effets peuvent être non négligeables pour les enjeux situés à proximité.



*Figure 11 : Cale d'accès au lagon entourée par des murs maçonnés (Papeete, Ph. C.Chene). La flèche bleue indique l'axe de pénétration potentielle de la mer sous l'effet de la surcote et des vagues*



*Figure 12 : Cale d'accès au lagon au premier plan, aménagements privés au second plan (mur et remblais), structures portuaires et industrielles à l'arrière plan (Papeete, Ph. C. Chene) – Artificialisation totale du trait de côte*



Figure 13 : Pénétration de la mer par une cale d'accès à la plage (Bernières-sur-Mer, 28 Février 2010, DDRM Calvados 2012)

- **Mur en enrochement avec remblai**

Il s'agit le plus souvent d'aménagements privés, généralement assez peu élevés entre 1 et 2m, qui ont permis un gain de terre sur le littoral (DPM). Dans certains cas, ces murs et remblais associés peuvent attendre une hauteur conséquente (Figure 14). Il peut aussi s'agir d'un aménagement collectif s'étendant sur plusieurs dizaines à centaines de mètres. Leur hauteur par rapport au niveau de l'eau est généralement faible (Figure 15). Dans certains cas, ces murs et remblais sont couronnés par une promenade cimentée bordée par un muret de faible hauteur censé prévenir de l'inondation de la bande littorale adjacente (Figure 15). Ces murs en enrochement peuvent être cimentés ou non.



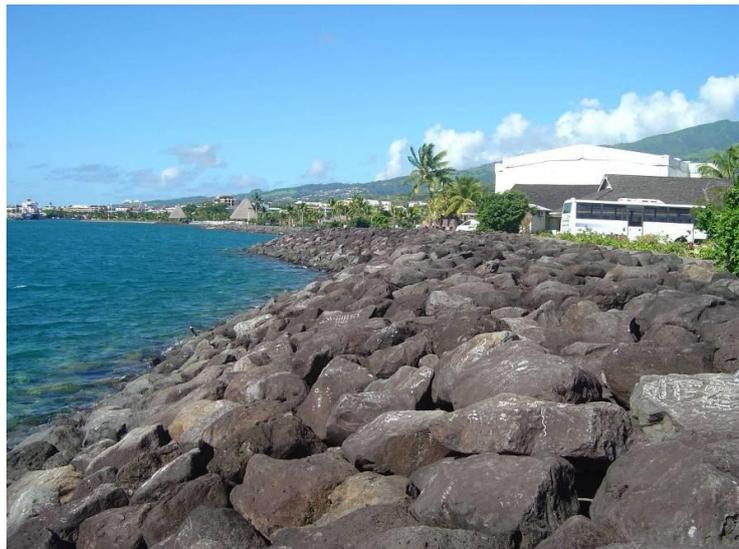
Figure 14 : Haut mur de bas de plage en enrochement cimenté avec balustrade, escalier et remblai (Commune de Paea, Ph . C. Chene)



*Figure 15 : Petits enrochements de faible altitude avec promenade et muret sur remblai (Commune d' Arue, ph. C. Chene) La dégradation du muret est à noter*

- **Enrochement de grande dimension avec remblai**

Ces enrochements de grande dimension sont généralement des aménagements issus des besoins de la collectivité afin de créer puis de préserver des terrains acquis au profit du platier ou de zones humides basses peu salubres. Ces enrochements ont généralement une longueur de plusieurs centaines de mètres, une profondeur et une hauteur de plusieurs mètres. Ils ont aussi un rôle de lutte contre l'érosion du trait de côte dans les zones qui y sont soumises (Figure 16).



*Figure 16 :Enrochements de grande ampleur et remblai en zone urbaine en zone de petit fond (Toa'Ta, Papeete, Ph. C. Chene)*

- **Mur en béton avec remblai**

Ces structures comprennent un mur ou un muret dont l'élévation est généralement de quelques décimètres au-dessus du niveau de la mer. Ce muret est réalisé en béton coulé en arrière duquel des remblais ont été versés afin de stabiliser et rehausser le niveau par rapport au terrain naturel (Figure 17). Ces structures constituent donc une artificialisation forte du trait de côte et contribue à le stabiliser. Elles restent au demeurant fragiles car exposées aux clapots et aux vagues lors des tempêtes. Leur faible hauteur par rapport au niveau de la mer les expose lors des tempêtes à un endommagement de la structure en béton par attaque des vagues mais aussi, du fait de la surcote, à des déferlements et à des submersions qui aboutissent parfois à des ravinements des terrains en remblai situés derrière (Figure 17).



Figure 17 : Aménagement littoral public de petit fond en mur béton et remblai (Huahine 2006, Ph. M. Garcin) A noter les affouillements du remblai en arrière du mur en béton



*Figure 18 : Succession continue en petit fond de murs en béton avec remblai et enjeux en arrière (Pirae, Ph. C. Chene)*



*Figure 19 : Aménagement privé d'un mur en béton avec remblai sur petit fond (Commune d'Arue, ph. C. Chene)*

- **Remblai de gros volume installé sur le récif frangeant**

Ce type d'aménagement est proche des précédents si ce n'est par l'ampleur du volume du remblai utilisé. (Voir exemple aménagements de Raïatea => maisons). Il s'agit le plus souvent de remblais tentaculaires installés sur le récif frangeant et qui sont organisés en plusieurs branches sur lesquelles sont construits soit des complexes hôteliers, soit des résidences privées. Des dragages et des créations de chenaux dans le platier y sont généralement associés en vue de faciliter l'accès des embarcations à ces structures. Ce type d'aménagement contribue à la dégradation de l'environnement récifal selon plusieurs aspects :

- à cause de l'apport de remblai et de sédiment, ce qui contribue à augmenter la turbidité de l'eau et qui est défavorable aux écosystèmes lagonaires et récifaux,
- par une modification des courants intra-lagon,

Ce type d'aménagement affecte l'aléa submersion à la côte en modifiant la bathymétrie du platier et donc la dissipation de l'énergie des vagues. Mais les remblais peuvent être eux-mêmes fortement dégradés voire détruits lors des événements tempétueux par action directe des vagues, contribuant à mettre en danger les enjeux qu'ils supportent. De plus, la remobilisation des sédiments du remblai lors de son érosion et endommagement lors des tempêtes contribuera à altérer la qualité des eaux du lagon.



*Figure 20 : Important remblais effectué sur le récif frangeant du Sud de Raiatea. Cet aménagement avance de 475m dans le lagon par rapport au littoral ; haut : image Digiglobe, la flèche indique l'axe de vue de la photo du bas (M.Garcin 2005)*

### 3.1.2.2 **Aménagements de haut de plage**

Les aménagements présents en haut de plage sont très variés dans leurs formes et leur mode de construction. Ils visent en général à stabiliser le trait de côte, à valoriser un terrain notamment en le nivelant et en le remblayant, et à délimiter une propriété. Les murs et enrochements qui y sont présents perturbent la dynamique hydro-sédimentaire cross-shore en empêchant les transferts sédimentaires entre le bas de plage, la plage et le haut de plage. La présence d'ouvrages, notamment verticaux, en haut de plage occasionne, lors des tempêtes, le déferlement brutal des vagues sur l'ouvrage avec une très forte énergie et une forte réflexion. Ce déferlement brutal contribue à mobiliser les sédiments présents sur la plage qui sont alors emportés lors du reflux en bas de plage ou en avant plage provoquant une érosion rapide. Il est fréquent d'observer à peu de distance de ces murs ou enrochements des habitations qui de fait sont très exposées aux vagues et à la submersion marine. De plus, dans le cas de l'occurrence d'un événement fort à extrême, la destruction au moins partielle de ces ouvrages n'est pas à exclure surexposant alors l'enjeu à l'aléa.

Ce type d'aménagement contribue donc fortement à diminuer la résilience du littoral face aux processus d'érosion et indirectement à favoriser les constructions d'enjeux dans des zones d'aléa.

- **Mur en enrochement avec remblai**



*Figure 21 : Murs de bas de plage en enrochement cimenté (premier plan), non cimenté (second plan) (Commune d'Arue, plage publique, Ph. C. Chene)*



Figure 22 : Mur en enrochement de haut de plage avec remblai et enjeux en arrière (Commune d'Arue Plage Lafayette, photo C. Chene)

- **Enrochement**

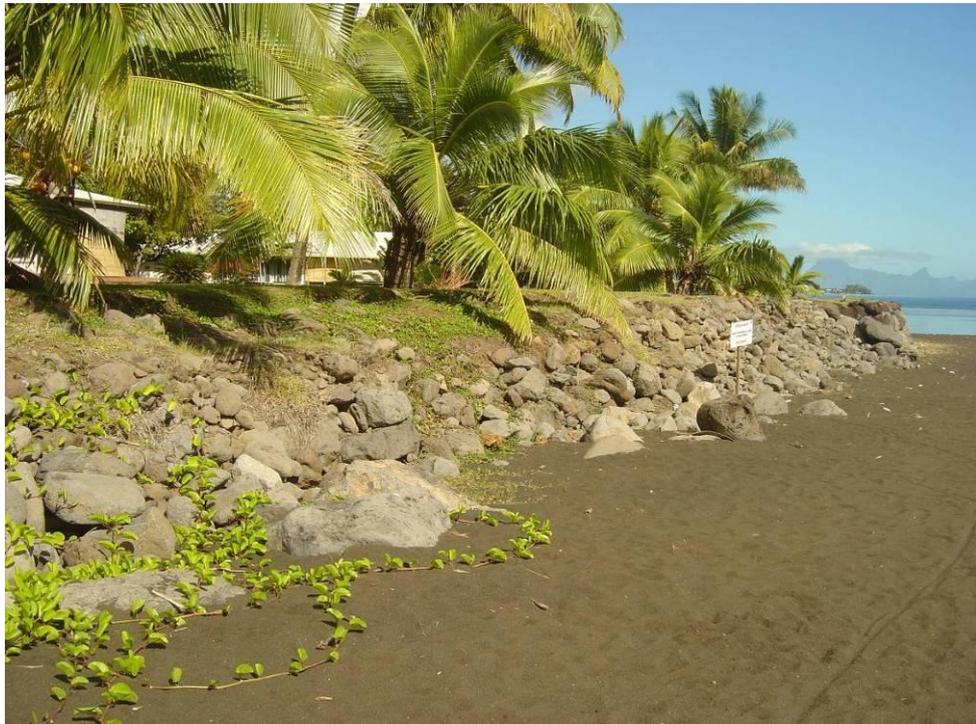


Figure 23 : Enrochement incliné et fortement dégradé de haut de plage (photo C. Chene)

- **Mur en béton / parpaings avec remblai**



Figure 24 : Aménagement privé, mur en béton et haut de plage et remblai (Commune d'Arue Aire de loisir Vaipoopoo, photo C. Chene)

- **Mur sans remblai**



Figure 25 : Mur avec palissade en haut de plage sans remblai (ou faible épaisseur de remblai ; Arue, Commune d'Arue Aire de loisir Vaipoopoo, photo C. Chene)

### 3.1.2.3 **Aménagements en arrière-plage, arrière littoral**

Ce type d'aménagement s'observe en arrière du littoral, dans des zones potentiellement soumises à l'aléa submersion marine. Il s'agit le plus souvent d'aménagements visant à valoriser des terrains de zones humides basses, fréquemment exposés à un aléa d'inondation fluviale et/ou de submersion marine. Il s'agit la plupart du temps de nivellement de terrain et de remblais protégés par des enrochements à gros blocs, et dans certains cas par des murs. Bien que ne visant pas à l'origine une protection

spécifique contre la submersion marine, il contribue à mettre hors d'eau des zones qui sont loties (Figure 26). Ces zones basses sont de fait assez fréquemment des zones d'aléa mixte, c'est-à-dire des zones où l'inondation est due au débordement des rivières mais aussi à une surcote marine. La réalisation de ces remblais, qui peuvent occuper des surfaces importantes par rapport à la surface totale inondable, contribue à réduire les zones naturelles d'expansion des crues en ayant pour conséquence une augmentation de la hauteur d'eau lors des inondations des zones non remblayées. Ainsi, l'aléa est augmenté pour les zones qui n'ont pas été rehaussées et qui sont elles aussi fréquemment occupées par des habitations.

La réalisation de ces remblais qui permettent ponctuellement de réduire l'aléa submersion marine peut donc avoir des effets très négatifs sur l'aléa inondation fluviale ou sur le niveau d'aléa des espaces voisins. La prise en compte du contexte géomorphologique dans lequel l'aménagement est réalisé est donc un facteur primordial à prendre en compte afin d'éviter ces effets négatifs indirects.



Figure 26 :Création de remblais dans des zones inondables littorales (Raïatea 2005, Ph. M.Garcin)

### **3.1.3 Le problème de la dégradation (entretien) des aménagements et des ouvrages polynésiens**

La présence d'ouvrages de protection a pour objectif de protéger des enjeux d'un certain niveau d'aléa. Se pose alors classiquement le problème du dimensionnement de l'ouvrage : quel sera la période de retour de l'aléa dont on voudra se protéger ? Comment évaluer l'intensité de l'aléa par rapport à cette période de retour de référence ? Quelles

sont les incertitudes concernant l'évaluation de l'intensité de l'aléa pour la période de retour de référence ?

Lorsque ces questions sont résolues, l'ouvrage peut être alors dimensionné pour faire face à son aléa de référence. Dans le cas où l'ensemble de ces paramètres sera bien défini et que la réalisation / mise en œuvre de l'ouvrage sera faite dans les règles de l'art, l'ouvrage assurera sa fonction correctement. Toutefois, un paramètre qui est parfois occulté et qui a été, malheureusement, mis en évidence lors de certains événements récents tel que la tempête Xynthia en métropole, est le vieillissement et la dégradation de certains ouvrages. Ces ouvrages, qui n'ont fait l'objet ni d'un suivi ni d'un entretien, ont subi des dysfonctionnements importants. Ces derniers ont conduit, suite à la formation de brèches dans certaines digues et levées par exemple, à la propagation de la submersion marine.

Ces événements récents nous ont sensibilisés à l'importance du suivi dans le temps des ouvrages, notamment à leur vieillissement, à leur dégradation lors de tempêtes précédentes voire à leur endommagement. L'ensemble de ces facteurs a conduit à fragiliser les systèmes de protection qui lorsqu'ils ont été fortement sollicités ont défailli, entraînant de fait une submersion de zones théoriquement protégées.

Dans le cas de la Polynésie Française, le nombre d'ouvrages et d'aménagements collectifs est relativement faible, mis à part les remblais routiers, qui représentent des linéaires très importants, et les structures portuaires, aéroportuaires et urbaines à Papeete. Leur rôle indirect et partiel sur la propagation des submersions n'en est pas moins important, d'autant que de nombreux enjeux (habitations notamment) sont localisés en arrière. Ces remblais et murs ou enrochements associés sont localement très sollicités lors des tempêtes, ce qui dégrade rapidement leur état.

Les aménagements et ouvrages d'initiative privée sont en revanche extrêmement nombreux et jouent un rôle au moins local sur la préservation de certains enjeux contre les submersions marines (au moins pour les événements d'intensité modérée).

Les observations réalisées sur le terrain (C. Chene) démontrent que dans de nombreux cas ces aménagements d'initiative privée n'ont pas toujours fait l'objet d'un suivi et encore moins d'entretien après leur mise en place. Leurs dégradations parfois très importantes (Figure 27, Figure 28, Figure 29, Figure 30, Figure 31, Figure 32) conduit à annuler l'efficacité de tel dispositifs et même dans certains cas à les rendre dangereux, soit lors de l'occurrence d'une tempête, soit même en période de calme. Or, les enjeux censés être protégés par ces aménagements sont eux toujours en place et se retrouvent, de ce fait, beaucoup plus exposés à l'aléa qu'auparavant.

La sensibilisation des acteurs aussi bien publics que privés à ce problème de la surveillance et de l'entretien des ouvrages et aménagements nous paraît donc un point qu'il est important de développer.



*Figure 27 :Exemple de dégradation et déchaussement d'aménagements par attaque de vague et érosion en haut de plage. Le manque d'entretien des aménagements compromet fortement leurs fonctions (Commune d' Arue, plage Lafayette, ph. C. Chene)*

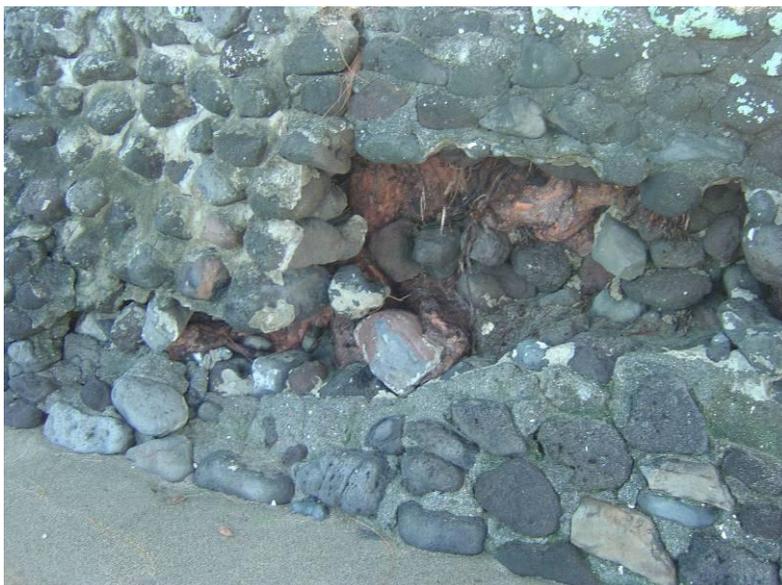


Figure 28 : Dégradation dans un mur de haut de plage maçonné par attaque directe des vagues (Papara, Ph. C. Chene)



Figure 29 : Affouillement et érosion des remblais situés en arrière des enrochements par déferlement au-dessus de l'ouvrage (Parara, face à la passe de Rairoa, Ph. C. Chene)



*Figure 30 : Très forte dégradation d'un muret en béton et affouillement des terrains en arrière de l'ouvrage (Pirae)*



*Figure 31 : Très forte dégradation d'un mur béton en haut de plage (Pirae, Ph. C. Chene)*



Figure 32 : Dégradation et déchaussement en haut de plage de la base d'un mur par érosion de la plage

## 3.2 QUELQUES APPROCHES DE PROTECTION CONTRE LES SUBMERSIONS MARINES DANS LE MONDE

### 3.2.1 Ouvrages de protection

Les ouvrages de protection contre la submersion marine sont souvent indissociables de ceux édifiés pour la lutte contre l'érosion, ces deux processus étant souvent liés (Sanquer 2009). Les ouvrages peuvent ainsi être classés selon leur action sur le facteur responsable du mode de submersion : limiter l'action des vagues, limiter les débordements dus à la surcote, etc.

#### 3.2.1.1 *Les brise-lames*

Ces ouvrages longitudinaux ont pour objectif de protéger la côte de la houle. Ils sont localisés en petits fonds en avant ou dans la zone de déferlement et peuvent être soit partiellement soit totalement immergés (Sanquer 2009). Les matériaux les constituant sont variés (enrochements, gabions, caissons en béton, palplanches etc.). Ils génèrent le déferlement de la houle et une perte d'énergie par absorption et réflexion, et protègent ainsi la côte située en arrière de l'ouvrage. Ils sont le plus souvent installés dans des mers microtidales (Méditerranée par exemple) et permettent de fixer les fonds et de créer des dépôts dans la zone de calme qu'ils procurent. Leur impact visuel est important tout comme les contraintes qu'ils génèrent pour la navigation.

#### 3.2.1.2 *Les pieux hydrauliques*

Cette technique est plus expérimentale et consiste à planter des alignements de pieux (en bois par exemple) parallèlement au trait de côte afin d'atténuer l'énergie des houles avant son arrivée à la côte, de disperser son énergie et ainsi d'atténuer la remise en suspension

des sédiments (Sanquer 2009). Cette technique peut donc indirectement diminuer l'aléa submersion marine en atténuant les houles arrivant aux rivages dans le cas d'une exposition à une submersion par franchissement de paquets de mer.

L'impact esthétique de ce dispositif n'est pas négligeable, tout comme les contraintes éventuelles pour la navigation ou pour l'accès à la mer.

### 3.2.1.3 **Les atténuateurs de houle**

Les atténuateurs de houle reposent sur le principe de créer des obstacles aux écoulements sur le fond. Ils sont en quelque sorte des brise-lames sous-marins qui peuvent être constitués de tubes géotextiles remplis de sable et posés sur un géotextile anti-affouillement posé au fond (Koffler et *al.* 2009 ; Figure 33). Dans ce cas, ils sont souvent associés à un rechargement de plage. Ils ont peu d'impact visuel mais peuvent avoir des impacts environnementaux en modifiant les fonds à leur emplacement, en impactant les zones de prélèvement de sable servant à les remplir et enfin, en permettant un développement spécifique d'algues sur les structures.

D'autres atténuateurs peuvent se présenter sous la forme d'épis filiformes sous-marins perpendiculaires aux courants et à la ligne de rivage favorisant la bio-construction et agissant comme un récif artificiel (expérimentation au Cap Ferret, Sanquer 2009).

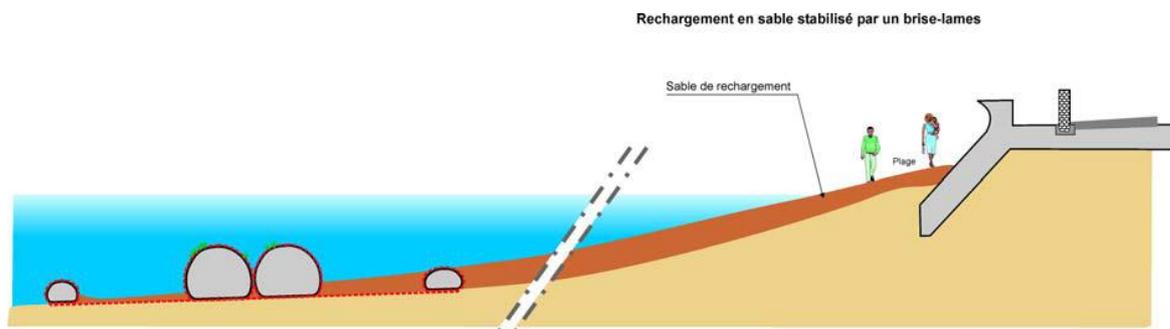


Figure 33 : Coupe de principe d'un atténuateur de houle (Koffler et *al.* 2009)

### 3.2.1.4 **Les digues anti-submersion**

Les digues sont très utilisées pour défendre des zones basses contre les submersions marines. Elles permettent aussi de mettre en valeur de nouvelles terres situées au niveau ou sous le niveau de la mer (polder) au Pays-Bas par exemple, mais aussi en métropole (Baie de l'Aiguillon, baie de Bourgneuf, Marais de Guérande...). On distingue trois principaux types de digues en fonction de leur mode de construction (Sanquer 2009) :

- Les digues verticales à parement externe vertical à sub-vertical, réfléchissant une grande partie de l'énergie des houles vers le large,
- Les digues à talus sur lesquels se brise la houle, avec une dissipation partielle de l'énergie dans la structure et une partie réfléchi vers le large,

- Les digues mixtes qui sont la combinaison des deux, c'est-à-dire un talus en assise et une partie sub-verticale.

Au Pays-Bas, la gestion de ces digues est très rigoureuse, une grande surface du pays (environ 1/3) étant sous le niveau de la mer et donc dépendante de l'état et de l'intégrité de ces digues. Elles font donc l'objet d'un suivi régulier.

Ce type d'ouvrage garantit un bon niveau de protection s'il est bien maintenu et entretenu, que sa construction a fait l'objet d'études de dimensionnement adaptées, et que la construction de l'ouvrage a été réalisée selon les règles de l'art. L'efficacité du dispositif est correcte tant que l'aléa est inférieur à l'aléa maximum pris en compte dans le projet (si toutes les autres conditions exprimées précédemment sont réunies). Se pose toutefois le problème de la définition de l'aléa de référence et de son éventuelle sous-estimation.

En métropole par exemple, la tempête Xynthia en 2010 a montré les limites de ce type de dispositif avec d'une part des surverses généralisées au-dessus de certains ouvrages (La Faute-sur-Mer par exemple) et d'autre part, des brèches qui ont entraîné le dysfonctionnement total de ces ouvrages (Digues de l'Aiguillon, de Guérande par exemple ; Figure 34 et Figure 35).

Le tsunami de 2011 au Japon a montré lui aussi les limites inhérentes à ce type d'approche, même si l'ampleur de la submersion générée par le tsunami est sans commune mesure avec celle des submersions marines d'origine météorologique. En effet, l'intensité du tsunami de 2011 était supérieure à l'intensité maximum prise en compte lors de la conception de ces digues. Elles ont donc été largement submergées et endommagées lors de l'événement et n'ont pas joué leur rôle.

Le sentiment de sécurité engendré par la présence des digues favorise des développements urbains et industriels importants dans des zones d'aléa fort (zones basses littorales). Cette augmentation des enjeux humains et économiques, dans les zones exposées qui sont impactées lors de l'occurrence d'un événement supérieur à celui qui a servi au dimensionnement des ouvrages, conduit à des catastrophes. Ce type d'ouvrage, dont la mise en place a un coût très élevé pour la société, peut engendrer, si la conception ou la réalisation de l'ouvrage n'est pas adapté à l'aléa, une augmentation du risque par une surexposition des enjeux à l'aléa.



*Figure 34 : Brèches dans les digues suite au passage de la tempête Xynthia (2010) : brèche dans la digue marine du Marais de Guérande (haut), destruction d'une digue sur l'île de Ré (bas)*



*Figure 35 : Brèches et fortes dégradations de la digue de l'Aiguillon lors de la tempête Xynthia (2010)*

### 3.2.1.5 *Les petits ouvrages*

En dehors des grands ouvrages cités précédemment, des stratégies locales visant à limiter la propagation des inondations et submersions existent. Il s'agit généralement d'ouvrages de taille plus modeste visant à réduire l'impact d'un aléa.

- **Porte étanches et batardeaux**

Les batardeaux sont des dispositifs anciens qui ont été beaucoup utilisés pour bloquer la propagation des inondations en domaine fluvial aussi bien sur le Rhône (Figure 36), sur la Loire, et sur tous les grands fleuves métropolitains. Ces systèmes amovibles simples consistent à bloquer temporairement le passage de l'eau dans une porte, un mur, une digue, un rempart etc. Des déclinaisons plus modernes existent à l'heure actuelle de ces batardeaux, notamment au niveau des matériaux utilisés pour leur réalisation. Ces batardeaux peuvent être utilisés aussi bien pour contrer les inondations fluviales que les submersions marines (Figure 37). Une variante de ces batardeaux existe sous la forme de portes étanches qui ont l'avantage de rester sur place (Figure 40).

Ces dispositifs ne permettent de réduire la propagation de la submersion que sur une hauteur de quelques centimètres à décimètres et ainsi limiter les dégâts, mais ne peuvent être une solution dans les zones où la submersion atteindrait des hauteurs élevées.



*Figure 36 :Batardeau en planche de bois installé pour contenir une crue du Rhône au début du XXème siècle (Archives Municipales d'Avignon)*



Figure 37 : Batardeau moderne (aluminium) installé en haut de plage suite à la tempête Xynthia (Châtelailon, Sud-Ouest)

- **Murets et rehaussement de murs**

Associés aux batardeaux et aux portes étanches, des murets de quelques décimètres de hauteur sont parfois érigés en vue de contenir la pénétration de la mer lors des tempêtes. Contrairement aux batardeaux, ces dispositifs sont pérennes ce qui peut éventuellement modifier les dynamiques hydro-sédimentaires et les échanges dune-plage ou les modalités des écoulements des fleuves dans les zones d'estuaires. Ils ne peuvent contenir que des hauteurs d'eau relativement faibles dans des milieux plutôt calmes, peu énergétiques et à faible vitesse d'écoulement. Dans le cas où ces dispositifs seraient installés dans des zones à forte hauteur d'eau, forte vitesse d'écoulement ou dans la zone de déferlement des vagues, ils seraient très rapidement endommagés et ne pourraient ainsi assurer leur rôle de protection.

Après l'occurrence d'un événement « exceptionnel » en regard avec le dimensionnement de l'ouvrage, on observe généralement une phase de consolidation et de surélévation des murs et ouvrages existants qui ont été dépassés. Ce type de réaction de la société est un grand classique et s'est produit par exemple au cours des siècles passés, notamment lors des grandes inondations de la Loire au XIX<sup>ème</sup> siècle (1846, 1856, 1866). En effet, après chaque inondation, les levées (digues) qui avaient été submergées et/ou bréchifiées étaient surélevées afin de garantir une protection supérieure.

Les exemples ci-dessous (Figure 38 et Figure 41) montrent des aménagements réalisés contre la submersion à Andernos-les-Bains (Bassin d'Arcachon). Cette zone urbanisée a en effet été affectée de façon récurrente au cours des dernières années par des submersions marines (tempêtes Klaus, Xynthia...).

Les aménagements ont consisté à rehausser les murs de bord de plage, à fermer certains accès à la mer, à créer un second muret de protection, équipé de portes étanches, qui piège l'eau lors des débordements par paquet de mer. De plus, tous les drains présents dans les murs de bord de mer sont maintenant équipés de clapets anti-retour afin de permettre l'évacuation des eaux en temps normal mais éviter la pénétration de la mer lors des fortes surcotes. Ce dispositif a été testé lors d'une tempête ordinaire d'hiver au mois

de décembre 2011, les photos de la Figure 42 permettent de se rendre compte du fonctionnement du système. A noter le franchissement des ouvrages par paquets de mer et le rôle de bassin de rétention joué par l'espace entre les deux enceintes de mur.



*Figure 38 : Réhaussement de muret et ajout d'une seconde ligne de murets suite à Xynthia (Andernos-les-Bains, Photo Observatoire de la Côte Aquitaine)*



*Figure 39 : Réhausse de muret et fermeture provisoire d'accès à la plage par batardeau (Andernos-les-Bains, Photo Observatoire de la Côte Aquitaine)*



Figure 40 : Installation de porte étanche suite à Xynthia (Andernos-les-Bains, , Photo Observatoire de la Côte Aquitaine)



Figure 41 : Buse d'évacuation équipé d'un clapet anti-retour coté océan à Andernos-les-Bains (Photo Observatoire de la Côte Aquitaine)



Figure 42 : Fonctionnement du système de protection contre la submersion marine pendant une tempête d'hiver à Andernos-les-Bains (Décembre 2011, photo. Observatoire de la Côte Aquitaine)

### 3.2.1.1 **Le rechargement de plage**

Le rechargement de plage ne constitue pas stricto sensu un ouvrage, mais plutôt des actions palliatives à l'érosion. Il est généralement opéré dans des zones d'érosion de plage importante et est utilisé en alternative ou en complément aux méthodes « dures » de protection telles que les épis, les brise-lames ou les atténuateurs de houle. Le rechargement est effectué soit sur la plage elle-même, soit en avant-plage dans les petits fonds (Sanquer 2009). Le rechargement contribue à modifier l'aléa submersion en créant une zone tampon, en repoussant le trait de côte vers le large et en modifiant éventuellement le profil de la plage et de l'avant-plage.

Cette méthode dite « douce » en opposition aux ouvrages de type brise-lames et épis n'est pas sans contrainte car elle modifie les environnements naturels, dégrade éventuellement les fonds dans les zones où ont été prélevés les sédiments et demande généralement un suivi temporel à long terme et des rechargements « d'entretien ».

Cette technique est très pratiquée aux Pays-Bas ainsi qu'en métropole, notamment en Languedoc-Roussillon, Charente-Maritime, Vendée, Bretagne, etc.

### 3.2.2 Stratégies alternatives

#### 3.2.2.1 *La stratégie de diminution des risques côtiers à Hawaii*

L'état d'Hawaii est un archipel de 19 îles volcaniques dont les 8 îles principales sont Niihau, Kauai, Oahu, Molokai, Lanai, Kahoolawe, Maui et l'île d'Hawaii ; sa population est de l'ordre de 1,3 millions d'habitants. Ces îles sont soumises à un climat tropical cyclonique, même si les cyclones sont relativement peu fréquents. Le contexte de l'archipel Hawaïen est donc assez proche de celui de la Polynésie française.

L'urbanisation côtière à Hawaii a, dans le passé, été très similaire à celle de la Polynésie Française d'aujourd'hui. En effet, les constructions privées se sont massivement implantées sur le littoral, en prenant chacune des mesures individuelles de protection contre l'érosion et la submersion. Cette phase de construction a abouti à l'époque à des implantations très proches du trait de côte, voire dessus.

Durant les décennies passées, des cyclones et des tempêtes tropicales ont affecté Hawaii et occasionné de nombreux dégâts, notamment dans les zones basses qui avaient été loties et sur celles situées à proximité immédiate du trait de côte. Ces événements ont poussé les autorités et organismes hawaïens à une réflexion sur la gestion des risques littoraux.

La dégradation très rapide de la côte a été constatée dans les zones où s'étaient développées ces propriétés. Les observations ont montré que ces dispositifs de protection individuelle diminuaient la résilience de la côte à l'érosion et à la submersion marine (*storm surge*) durant les cyclones (Eversole & Norcross-Nu'u 2006).

Suite à cette prise de conscience et aux études qui s'en sont suivies, une réglementation stricte a vu le jour. Pour toute installation et construction dans la bande littorale, les propriétaires doivent en effet, à travers un organisme ou bureau d'étude agréé :

- analyser l'évolution de la côte sur les dernières décennies,
- faire certifier la position du trait de côte sur la propriété (notion de *trait de côte « certifié »*),
- évaluer la « *Shoreline SetBack* » c'est-à-dire la distance en arrière de laquelle il sera possible de construire. Cette « *Shoreline SetBack* » est égale à 70 fois le Taux d'érosion annuel calculé auquel on ajoute une distance forfaitaire de 12m (40 pieds).

Il ne peut y avoir de construction entre le trait de côte et la « *Shoreline setback* », de surcroît toute création d'ouvrage de protection (notamment contre l'érosion) est soumise à l'obtention d'une autorisation prouvant qu'aucune autre solution n'est possible (Eversole & Norcross-Nu'u 2006).

La position du trait de côte certifié délimite aussi le partage des responsabilités, qui sont soit du ressort de l'état entre l'Océan et le trait de côte certifié (équivalent du DPM en Polynésie) soit du ressort du comté entre le trait de côte et la « *Shoreline SetBack* ».

Le système d'assurance a aussi un rôle de sensibilisation et de prévention pour la prise en compte des risques littoraux et notamment de la submersion marine. En effet, le coût de l'assurance d'un bien est lié au niveau d'aléa centennal auquel il est exposé.

Le *FIRM (FEMA Flood Insurance Rate)* est le document cartographique de référence établi par la FEMA (Federal Emergency Management Agency ; [www.fema.gov](http://www.fema.gov)) qui permet de définir le taux d'assurance d'un bien en fonction de l'aléa inondation (inondation fluviale ou de submersion marine).

De plus, le code de construction stipule que la base de la structure doit être au-dessus du niveau maximum d'inondation (valeur centennale). Mais la prime d'assurance peut être moins chère si la construction est résiliente (sur pilotis par exemple) et si elle prend en compte correctement le niveau d'aléa (par exemple avec une élévation de la base du bâtiment au-dessus du niveau maximum du *storm surge*). Une assurance spécifique pour le risque de submersion/inondation est obligatoire et exigée par les banques et les organismes de prêt si la propriété est localisée dans un secteur exposé à l'aléa. Enfin, les assurances contre les inondations/submersions ne couvrent pas les érosions chroniques et à long terme, ni les dégâts dus au vent.

A Hawaii, des spécifications et conseils sont fournis afin que les bâtiments soient plus résilients aux effets des cyclones (Eversole & Norcross-Nu'u 2006). Cette augmentation de la résilience doit prendre en compte d'une part l'aléa submersion marine, mais aussi l'aléa vent. Les constructions sur pilotis doivent par exemple remonter la base de la construction au-dessus du niveau de la mer en intégrant la hauteur de la surcote et la hauteur des vagues. Si des murs existent entre les piliers du RdC, ils doivent être conçus pour casser si des vagues déferlent dessus dans le but de ne pas affaiblir les pilotis et mettre en péril les étages supérieurs de la construction. De même, s'il existe des murs porteurs en rez-de-chaussée, ils doivent être orientés perpendiculairement à la ligne de rivage soit parallèlement à l'axe de propagation des vagues de façon à ne pas être mis en péril.

Mais il a été constaté que ces constructions sur pilotis sont plus exposées et plus vulnérables aux vents. La clé de la réduction de la vulnérabilité aux vents réside dans la qualité du design et de la construction. Ceci implique qu'une étude préalable à la construction du bâtiment soit réalisée par des architectes compétents dans ces domaines.

Il faut noter que le problème de l'érosion et des affouillements liés à la submersion ne sont pas évoqués par les textes, mais devraient aussi être pris en compte, car ils peuvent fortement altérer la résilience des bâtiments en déchaussant partiellement ou complètement les fondations des piliers.

Des règles strictes s'appliquent en cas d'endommagement :

- Pour une construction légale faite postérieurement à l'instauration de la *Shoreline Setback* et donc en arrière de celle-ci, si l'endommagement est inférieur à 50% de la valeur du remplacement du bien, la réparation peut être autorisée. Dans le

cas contraire la structure doit être reconstruite en appliquant les nouvelles normes en vigueur ( ?)

- Pour une construction dite illégale (acquise légalement mais avant l'instauration de la *Shoreline Setback*), les mêmes principes sont appliqués avec obligation de se conformer à la nouvelle réglementation.

Comme nous l'avons signalé précédemment, les ouvrages de protection de la ligne de rivage (mur, enrochement, épis etc.) sont pour la plupart privés (comme en Polynésie) et hérités des années antérieures. Leur entretien incombe et est sous la responsabilité du propriétaire, et en aucun cas sous celle de l'état ou du comté (Eversole & Norcross-Nu'u 2006). C'est donc aux propriétaires de faire en sorte que les ouvrages soient en bon état.

### 3.2.2.2 **Le Plan Submersions Rapides**

Suite aux événements de 2010 en métropole (Submersion marine lors de Xynthia et inondation du Var), des réflexions ont été lancées sur les submersions rapides et ont donné lieu à la rédaction d'un ouvrage : le « Plan sur les Submersions Rapides » (DGPR 2011). Certains points soulevés dans cet ouvrage nous paraissent utiles à la réflexion menée dans le cadre du projet Arai. Ces points sont brièvement résumés ci-dessous.

La stratégie dite « sans regret » y est fortement conseillée (p. 16 Plan Submersion, 2011). Cette stratégie vise à maîtriser l'urbanisation en zone côtière avec comme impératif de limiter l'implantation de population et d'enjeux dans les zones fortement exposées à l'aléa. Des solutions doivent être trouvées pour résorber les situations à risque héritées des périodes antérieures. La délocalisation restant le moyen ultime quand aucune autre solution viable n'a été trouvée.

Ce plan conseille d'intégrer l'élévation du niveau marin futur, quel qu'en soient les causes réelles, ceci afin d'éviter de favoriser des implantations qui aujourd'hui seraient hors aléa mais pourraient se retrouver exposées à cause de cette élévation du niveau marin.

La réalisation d'ouvrage (digue) en vue d'ouvrir des territoires à la construction et à l'urbanisation n'est pas permise. Les systèmes de protection doivent être considérés comme des approches complémentaires qui ne peuvent se substituer à la réduction de la vulnérabilité (p17 Plan Submersion).

Il ne peut y avoir de nouvel ouvrage que si les autres dispositions propres à assurer la sécurité ont été mise en œuvre. Une analyse coût-bénéfice devra alors être réalisée et démontrer que la réalisation d'un ouvrage est la solution la plus favorable.

Les aménagements existants ne devront pas altérer le bon fonctionnement des milieux, notamment les milieux dunaires et lagunaires. Les espaces de divagation des cours d'eau devront être respectés voire restaurés.

La réalisation d'habitats résilients ou l'augmentation de la résilience des habitats est évoquée comme une solution dans les zones exposées à un niveau d'aléa raisonnable, tout comme le développement de la capacité de résilience des populations.

Les ouvrages de protection sont traités dans un volet spécifique. Des recommandations sur leur identification, l'évaluation de leur état et de leur mise en sécurité y sont émises.

De plus, le développement du suivi et de l'observation du littoral ainsi que la mise en réseau des observatoires font partie des recommandations de ce plan. La modernisation des ouvrages est envisagée tout comme les mesures favorisant le bon état des défenses naturelles tels que les cordons dunaires, les lagunes et les zones d'expansion des crues.

Enfin, un accent particulier est mis sur le nécessaire développement des Plans Communaux de Sauvegarde.

### 3.2.2.3 **Exemple de développement de bâtiments résilients**

Dans les chapitres précédents, que ce soit à Hawaii ou dans le Plan Submersions Rapides français, le développement de la résilience, que ce soit au niveau individuel, des bâtiments, ou de façon collective, est souvent évoqué.

La construction de bâtiments résilients à l'inondation, qu'elle soit d'origine marine ou fluviale, consiste à construire des bâtiments susceptibles de maintenir en sécurité les personnes et les biens pour un certain niveau d'aléa.

Trois modes de construction peuvent être distingués :

- Les maisons sur pilotis,
  - Les maisons flottantes dites amphibies,
  - Les maisons bateau.
- a) Les maisons sur pilotis (Figure 43) gardent un lien fort avec le sol dans lequel elles sont bâties, on en rencontre dans de nombreux pays soumis à des inondations chroniques, les matériaux mis en œuvre et les techniques de construction sont variées. Pour une application de ces constructions dans un contexte de submersion marine en pays cyclonique il existe un certain nombre de contraintes par rapport au niveau d'eau maximum de la surcote, de la hauteur des vagues et de résistance aux vents ainsi qu'à la conception et à l'orientation des structures porteuses (cf. 3.2.2). L'*Asian Pacific Adaptation Network* (APAN, 2012) propose des solutions afin de réduire les dommages dans les zones côtières affectées par les cyclones et les *storm surges* dans le cadre de l'adaptation climatique. Bien que notre problématique ne soit pas uniquement celle de l'adaptation climatique, les propositions de l'APAN nous paraissent instructives :
- Augmenter l'élévation des bâtiments par la réalisation de pilotis, colonnes, piliers etc.,
  - Utiliser des bétons renforcés pour la construction,
  - Utiliser des fondations plus profondes.
  - Les municipalités et autres responsables peuvent, par désignation des zones à fort aléa, imposer ou encourager des adaptations des bâtiments dans ces zones. L'encouragement à la réalisation d'amélioration de la résilience de l'habitat existant ou à la construction de nouveaux bâtiments

résilients peut être réalisé par le biais de subventions prenant en compte une partie du surcoût à charge.

- b) Les maisons flottantes ou amphibies (Figure 44) sont des maisons qui reposent sur le sol mais qui sont susceptibles de remonter en même temps que le plan d'eau au cours d'une inondation (fluviale ou marine) ou au cours d'une simple variation du niveau. Ce type de maisons est expérimenté notamment aux Pays-Bas dans un contexte fluvial, des transpositions dans des pays tropicaux sont à l'étude. Ce type de maison ne peut pas a priori être installé dans des zones où l'eau est susceptible d'être affectée par des courants ou des vagues.
- c) Enfin, les maisons bateau (Figure 45) sont des maisons construites sur un caisson étanche, elles ne reposent en aucune façon sur le sol et sont de fait complètement aquatiques. Ce type de maison est développé notamment au Pays-Bas, avec des applications en Asie ou ce type d'habitat existe depuis longtemps sous une forme plus traditionnelle. Ce type d'habitat ne paraît envisageable que dans un milieu aquatique calme, c'est-à-dire qui n'est pas affecté de forts courants ni de vagues.

Il semblerait donc que le type de construction le plus adapté au contexte des zones submersibles polynésiennes soit des constructions sur pilotis, à condition bien entendu que le niveau d'aléa soit faible, et que ce niveau d'aléa (hauteur d'eau, vagues et vitesse de courant) ait été évalué correctement. Enfin, rappelons que ces constructions doivent également être capables de résister aux forts vents durant les cyclones, ce qui implique la prise en compte de cette contrainte durant leur conception.



Figure 43 : Maison traditionnelle sur pilotis dans une zone inondable de Raiātea (Gauche, Photo. M. Garcin) . Maison moderne sur pilotis à Hawaii prenant en compte une forte hauteur de submersion (Photo Dolan Eversole)



Figure 44 :Maison amphibie sur la rivière Mass (Pays-Bas, Photo. Bas Czerwinski)



Figure 45 : Maison bateau à proximité d'Amsterdam (Pays-Bas, Photo. Margriet Faber)

### **3.3 SYNTHÈSE**

L'ensemble des observations présentées précédemment sur les ouvrages et aménagements est regroupé dans le Tableau 3. Elles y sont classées par type puis par position sur le profil cross-shore. Pour chaque ouvrage ou aménagement est présenté l'objectif qui a prévalu à sa construction, ses effets (voulus ou non) sur la submersion marine, le coût relatif à sa construction, l'importance de son suivi et de son entretien, les incidences sur l'environnement et les écosystèmes, sur l'économie et le tourisme et enfin des remarques libres.

| Localisation                    | Type         | Localisation sur le profil cross-shore |                              |                                | Objectif initial | Effets   |  |   | Coût initial   | Surveillance & Maintenance nécessaires  | Incidence sur Ecosystème/environnement   | Incidence économique / touristique                          | Remarques   |  |
|---------------------------------|--------------|--|------------------------------|--------------------------------|------------------|--|--|---|--|---|--|---|---|--|
|                                 |              | Petits fonds et bas de plage           | Plage et haut de plage       | Arrière plage                  |                  | Effet sur l'aléa submersion marine                             | Effets indirect (volontaire ou non)  |   |  |   |  |   |   |  |
| Polynésie française             | Ouvrages. I  | Digues portuaires                      | ✓                            |                                |                  |  |  |   |  |   | Forte  | Forte   |   |  |
|                                 |              | Epis                                   | ✓                            | ✓                              |                  | Réduction de l'érosion   | Faible   | Report de l'érosion sur les segments adjacents                                | Elevé (collectif ou privé)   | Importante pour assurer l'efficacité  | Peu négative   | Peu négative (dégradation aspect littoral)                  | Faible contribution théorique de stabilisation de l'aléa submersion par conservation du profil de plage                                   |  |
|                                 |              | Routes (sur remblai)                   | ✓                            | ✓                              | ✓                | Accessibilité terrestre et mise hors eau                       | Contient les événements fréquents de faible intensité                              | Augmentation de la durée de la submersion en arrière si franchissement        | Elevé (collectif)  | Surveillance et maintenance importante dans les zones les plus exposées                       | Très négatif   | Très positive (accès facilité échanges éco., touristes...)  | Contribue à donner un faux sentiment de sécurité en arrière   |  |
|                                 | Aménagements |  | Slip et cale d'accès         | ✓                              | ✓                |  | Accessibilité au lagon   | Augmentation ponctuelle de l'aléa   |  | Relativement faible si collectif, élevé si privé  | Faible   | Faible (locale)   | Positive (accès pêcheurs, plaisanciers, touristes...)   |  |
|                                 |              |  | Chenalisation                | ✓                              |                  |  | Navigabilité lagon   | Augmentation locale de l'aléa   | Incidence sur l'érosion des plages et recul TC   | Elevé   | Nulle à faible   | Très Négatif (destruction partielle du récif)               | Positive (accès pêcheurs, plaisanciers, touristes...)   | L'augmentation de l'aléa dépend de l'ampleur de la chenalisation et de sa direction et de son alignement sur une passe |
|                                 |              |  | Mur enrochement avec remblai | ✓                              |                  |  | Gain de terre  | Réduction des événements fréquents de faible intensité                        | Erosion et sappe   | Elevé (individuel)  | Importante   | Très Négatif  | Négative car effet cumulatif (dégradation aspect littoral)  | Installation d'enjeux dans des zones exposées à l'aléa   |
|                                 |              |  | Mur enrochement avec remblai |                                | ✓                |  | Gain de terre et réduction de l'érosion locale                                     | Faible réduction de l'aléa mais forte augmentation de l'exposition des enjeux | Fixation du TC mais érosion de plage, interruption des échanges cross-shore                                      | Elevé (individuel)  | Importante   | Négatif   | Négative car effet cumulatif (dégradation aspect littoral)  | Installation d'enjeux dans des zones exposées à l'aléa   |
|                                 |              |  | Mur béton avec remblai       | ✓                              |                  |  | Gain de terre  | Faible réduction de l'aléa mais forte augmentation de l'exposition des enjeux | Modification des échanges cross-shore entre le lagon et les zones de plage                                       | Elevé (individuel)  | Importante, exposition directe à l'action des vagues   | Forte dégradation pour le lagon et le récif frangeant       | Négative car effet cumulatif (dégradation aspect littoral)  | Forte exposition des enjeux surtout lors des événements extrêmes   |
|                                 |              |  | Mur béton avec remblai       |                                | ✓                |  | Gain de terre  | Réduction des événements fréquents de faible intensité                        | Modification des échanges cross-shore entre le lagon et les zones de plage, augmentation de l'érosion des plages |   | Importante (fréquente altération des structures par dégradation, action des vagues et affouillement) | Forte dégradation des plages                                | Négative car dégradation des plages et dégradation aspect littoral  |  |
|                                 |              |  | Mur enrochement avec remblai |                                |                  | ✓  | Amélioration du terrain, mise hors d'eau pour les inondations fluviales ou marines | Surélévation des enjeux diminue la vulnérabilité                              | Restreint la surface alloué à l'épanchement des crues, augmentation des hauteurs d'eau                           |   | Fonction du nombre et de la hauteur de l'inondation / submersion                                     | Modification du paysage et des écosystème des zones humides | Faible  |  |
|                                 |              |  | Enrochement sans remblai     |                                | ✓                |  |  |   |  |   |  |   |   |  |
|                                 |              |  | Mur béton sans remblai       |                                | ✓                |  |  |   |  |   |  |   |   |  |
|                                 |              |  | Mur béton sans remblai       |                                |                  | ✓  |  |   |  |   |  |   |   |  |
|                                 |              | Ailleurs                               | Ouvrages                     | Digues et levées de protection | ✓                | ✓  |  | Protection contre la submersion ou mise en valeur de terre                    | Protection correcte si dimensionnement adapté  | Impression de sécurité favorisant l'installation d'enjeux en arrière et l'exposition à l'aléa | Très élevé (collectif) de l'ordre de 1M€/km (2010)   | Extrêmement importante                                      | Modification parfois très importante des écosystème et des paysages   | Coût Important   |
| Murets anti submersion          |              |  |                              | ✓                              | ✓                | Diminuer la pénétration de la submersion dans les zones basses | Modéré   | Écoulement des eaux de de surfaces  | Relativement modéré (collectif / individuel)   | Importante  | Modéré à moyenne (aspect paysagé)  | Faible  | Exemple Bassin d'Arcachon post Xynthia. Classique historique après un événement d'inondation rehausser l'existant jusqu'à la prochaine... |  |
| Portails étanches et batardeaux |              |  |                              |                                | ✓                | Permettre la fermeture des passage d'accès à la mer            | Modéré   |   | Modéré (petits ouvrages)   | Importante car conditionne le gain de sécurité  | Faible (installation dans des zones généralement très anthropisées)                                  | Faible  | Système permettant d'améliorer la résilience locale à la submersion pour des secteurs déjà partiellement protégés                         |  |

Tableau 3 : Tableau synthétique sur les différents types d'ouvrages ayant un rôle vis-à-vis de la submersion marine



## 4. Conclusions

### 4.1. TYPOLOGIE DES COTES ET MESURES DE PROTECTION EXISTANTES EN POLYNESIE ET DANS LE MONDE

La typologie des côtes des îles hautes face à la submersion marine a permis de différencier 7 types regroupés en deux familles à partir de critères géomorphologiques (côtes exposées « E » aux vagues et côtes protégées des vagues « P »). Le tri a été effectué par rapport à l'exposition aux vagues. Toutefois, au-delà de ce critère d'exposition aux vagues, la susceptibilité au wave-setup a été intégrée.

En effet, une côte exposée aux vagues subira une submersion de forte énergie (déferlement) ou le setup apparaîtra comme secondaire, tandis que dans les zones protégées la submersion sera induite par le wave setup et/ou par l'ensachage dans le lagon.

Sur les côtes des îles hautes polynésiennes, il n'existe quasiment pas d'ouvrage spécifiquement édifié pour lutter contre la submersion marine. En effet, il s'agit le plus souvent d'aménagements très variés tant sur leur forme, leur matériaux, leur statut (privé ou public) et leurs objectifs. Bien que leurs objectifs ne soient pas la lutte contre la submersion marine, ils contribuent à modifier l'aléa.

Les aménagements existants ont été érigés au fur et à mesure, sans cohérence d'ensemble. Ils ne sont donc pas dimensionnés pour résister et protéger les enjeux face à un événement de période de retour et d'intensité importantes, bien qu'ils contribuent à protéger les enjeux en arrière pour les événements fréquents (annuels à pluriannuels). De nombreux aménagements sont privés et n'ont parfois pas été suffisamment entretenus. Leur état actuel est fréquemment dégradé à fortement dégradé, ce qui peut les rendre inefficaces voir dangereux en cas d'événements forts à extrêmes.

Ces aménagements peuvent avoir des localisations variées sur le profil de plage : petits-fonds, bas de plage, haut de plage et arrière-plage. En fonction de leurs positions sur le profil, ils ont des effets induits néfastes sur les processus sédimentaires ; ils contribuent souvent à dégrader le littoral ainsi que les écosystèmes du lagon. Le blocage des échanges sédimentaires cross-shore ne permet plus, par exemple, le rééquilibrage des plages suite à une tempête, ce qui conduit à une érosion chronique et à l'impossibilité d'auto-restauration. En sus de l'impact sur les paysages et les écosystèmes, cette altération de la capacité de résilience du littoral contribue à augmenter l'exposition des enjeux à l'aléa submersion marine par rétrécissement des plages qui jouent normalement le rôle de zone tampon.

D'autres effets non-physiques sont induits par les ouvrages de protection contre la submersion marine ou contre les inondations. Il s'agit par exemple du sentiment de sécurité qui favorise le développement d'habitations, d'industries, de commerces etc. en arrière des ouvrages. Ce développement conduit à une augmentation significative

des enjeux dans la zone d'exposition à la submersion qui, en cas de rupture ou de sous-dimensionnement de l'ouvrage par rapport à un événement, peut conduire à des dommages très importants tant sur le plan humain qu'économique. A titre d'exemple, on peut citer la tempête Xynthia (2010) en métropole lors de laquelle des levées et des digues, sous-dimensionnées, ont subi une surverse généralisée conduisant à la submersion de surfaces très importantes engendrant une catastrophe. Dans un contexte d'aléa d'inondation fluviale, l'exemple des levées en Loire moyenne est intéressant. La création de levées (« *turcies* ») pour valoriser des terres a été initiée au Moyen-Age par l'édification de levées discontinues de faibles hauteurs. Ces levées ont permis l'installation progressive d'habitants sur ces terres initialement agricoles. L'occurrence de fortes crues responsables d'inondation affectant ces zones nouvellement acquises a poussé les autorités à rehausser ces levées et à les rendre continues permettant ainsi l'extension des villages et villes dans le lit majeur. L'occurrence de crues majeures et répétitive au XIXème siècle (1846-1856-1866) a occasionné des inondations catastrophiques suite à des ruptures de levées et des surverses conduisant à la rehausse systématique de ces levées après chaque inondation. Parallèlement, le développement exponentiel des villes et des activités économiques dans les secteurs inondables conduit à la situation actuelle où environ 300 000 personnes seraient impactées par l'inondation si une crue du type 1856 se produisait aujourd'hui (Source : CEPRI).

Il ne faut pas négliger le coût économique de la réalisation d'ouvrages, qui peut être d'autant plus élevé pour la société que l'évènement de référence utilisé pour dimensionner l'ouvrage aura une période de retour longue. A ce coût initial, il faut aussi ajouter le coût de la surveillance et de l'entretien de l'ouvrage dans le temps. Cet entretien est primordial pour garantir l'efficacité de l'ouvrage. En effet, l'absence d'entretien ou un entretien insuffisant peut conduire à la rupture de l'ouvrage lors de l'occurrence d'un événement avec des conséquences catastrophiques (exemple de Katrina aux USA, de Xynthia en France métropolitaine etc.). De surcroît, ce type d'ouvrage n'est intéressant que si son efficacité est avérée sur une longue période temporelle. Le changement climatique et la remontée du niveau marin envisagée pour les décennies à venir posent le problème de sa prise en compte dans ce type d'aménagement, d'autant que des incertitudes demeurent sur la valeur de son amplitude.

La construction d'ouvrages de protection, si elle s'avère nécessaire, doit prendre en compte l'ensemble des points précédemment évoqués. De plus, elle doit être adaptée au type de submersion auquel le site sera soumis (forte énergie, hauteur d'eau importante, zone d'inondation mixte inondation fluviale & submersion marine). De plus, l'édification d'ouvrages contre les submersions marines doit s'accompagner d'une réflexion préalable sur les éventuelles modifications des autres aléas induits par ceux-ci. A titre d'exemple, les zones basses polynésiennes loties correspondent assez souvent aux lits majeurs des zones aval des rivières à proximité de leur embouchure. La réalisation, soit de murs anti-submersion, soit de remblais modifie la géométrie de ces zones basses ainsi que les modalités des écoulements en cas d'inondation fluviale. La réduction de l'espace d'expansion des crues par la création de remblai conduirait à une augmentation des hauteurs et éventuellement des vitesses d'eau dans les zones non remblayées. Ces deux facteurs sont très préjudiciables en termes de

risque pour les populations et les biens qui sont localisés dans ces zones. Par ailleurs, la création par exemple d'un mur anti-submersion en travers d'une zone basse conduira à freiner l'évacuation de l'eau et donc à une durée d'inondation supérieure. Le processus sera le même en cas de submersion marine en arrière de l'ouvrage suite à une rupture localisée ou à une surverse. L'édification non raisonnée d'ouvrages de protection contre les submersions marines pourra aussi avoir des effets négatifs sur les processus d'érosion, en conduisant à une déconnexion des zones de haut ou d'arrière plage interrompant le transfert cross-shore de sédiment. La capacité de résilience de la côte à l'érosion sera fortement diminuée. Enfin, il faut rappeler l'impact paysager, culturel, touristique et donc économique et social que peut engendrer la réalisation d'ouvrages sur le littoral.

Des approches et stratégies alternatives de gestion du risque sont actuellement mises en œuvre ou envisagées dans plusieurs pays. Elles sont généralement une réponse aux dysfonctionnements et inconvénients des stratégies « *tout ouvrage* » qui avaient été élaborées auparavant. Elles visent en général à diminuer l'exposition des enjeux et des populations aux aléas par la mise en place d'un cadre réglementaire strict et contraignant (Hawaii) qui a été rendu nécessaire face à l'insoutenabilité de la situation actuelle héritée du passé. Parallèlement, le développement et la réalisation de constructions résilientes à l'aléa (ou aux aléas) et transparentes pour le milieu (atténuation des effets néfastes induits) est encouragé notamment par des mesures financières.

## 4.2. TESTS SUR L'EFFICACITE DES OUVRAGES DE PROTECTION

Les tests sur l'efficacité des ouvrages (Lecacheux et al., 2013) ont été réalisés sur les profils de type P2 et P4 (cf. Figure 1) fréquemment rencontrés sur les îles hautes de l'archipel de la Société. Il s'agit de profils comprenant un récif barrière et un récif frangeant (P4) ou situés dans l'axe d'une passe (P2). Sur chaque profil, trois scénarios correspondant à des conditions centennales (en 2100) sur différentes façades de Tahiti et Moorea ont été testés :

- ✓ façade très exposée (façades nord des îles) : Hs de 12 m et Tp de 12 s
- ✓ façade exposée (façades est/ouest des îles) : Hs de 9 m et Tp de 12 s
- ✓ façade faiblement exposée : Hs de 7 m et Tp 10 s

Pour les trois scénarios, le niveau d'eau est de 1.1m par rapport au niveau moyen (comprenant la marée aux plus hautes mers de vives eaux, la surcote atmosphérique centennale et une projection de l'élévation du niveau de la mer à 2100).

Pour ces tests, un aménagement de haut de plage (cf. Figure 2) correspondant à un remblai protégé par un mur ou des enrochements (cf. Figure 22) a été pris en compte. L'objectif étant de distinguer les configurations pour lesquelles des aménagements peuvent potentiellement être efficaces ou non, les dimensions ont été volontairement fixées de manière large (2m de haut et 30m de large) par rapport à ce qui est rencontré en Polynésie.

Ces tests ont permis de distinguer deux types de configurations dans le Tableau 4 :

- ✓ Les configurations pour lesquelles la mise en œuvre d'aménagements de protection individuels (ou semi-collectifs) n'est pas envisageable car (1) ils ne permettraient pas de réduire suffisamment le niveau de l'aléa et/ou (2) les débits franchissants pour un scénario de type centennal seraient trop importants pour que l'ouvrage puisse tenir sans endommagement.
- ✓ Les configurations pour lesquelles des aménagements en bordure de littoral sont susceptibles d'être efficaces pour réduire le niveau de l'aléa. Cependant, des études complémentaires sont nécessaires afin de déterminer la viabilité de tels aménagements de protection, notamment pour (1) étudier leur solidité par rapport aux phénomènes d'érosion (affouillement) qui n'ont pas été pris en compte dans cette étude (2) analyser les impacts environnementaux induits dont la perturbation des flux sédimentaires et (3) faire une analyse de dimensionnement complète.

Tableau 4 : Synthèse des résultats sur les tests d'efficacité des ouvrages de protection  
(Lecacheux et al., 2013)

|                                  | <b>Façade très exposée<br/>(type nord)</b> | <b>Façade exposée<br/>(type est/ouest)</b> | <b>Façade faiblement<br/>exposée (type sud)</b>                        |
|----------------------------------|--|--|--|
| <b>Profil<br/>de type<br/>P2</b> | Aménagement non<br>envisageable            | Aménagement non<br>envisageable            | Aménagement<br>envisageable mais<br>étude complémentaire<br>nécessaire |
| <b>Profil<br/>de type<br/>P4</b> | Aménagement non<br>envisageable            | Aménagement non<br>envisageable            | Aménagement<br>envisageable mais<br>étude complémentaire<br>nécessaire |

## 5. Bibliographie

- APAN (2012) - *Asian Pacific Adaptation Network* (2012) <http://www.apan-gan.net/>
- Chene C. (2011) - Moyens de protection face aux attaques de la mer en milieu lagunaire. Master 2, UPF 59 p.
- DDRM Calvados (2012) – Les risques majeurs calvadosiens, pp.43-48,
- Des Garets E. (2005) – Bilan des connaissances sur les surcotes marines en Polynésie. *Rapport BRGM/RP-55038-FR*, 57 p., 9 fig., 4 ph., 4 tab., 3 ann.
- DGPR (2011) - Plan submersions rapides. Plan interministériel coordonné par le Ministère de l'Ecologie, du Développement durable, des Transport et du Logement 78 p.
- Eversole D., Norcross-Nu'u Z. (2006) –Natural Hazard Consideration for Purchasing Coastal Real Estate in Hawaii : A practical guide of Common Questions and Answers. Publication of the State of Hawaii Department of Land and Natural Resources, Office of Conservation and Coastal Lands. 26 p., 9 figs.
- Garcin M., Pedreros R., Monfort D., Krien Y. (2011) – Base de données d'observation des effets de la tempête Xynthia sur le littoral. Rapport -BRGM/RP-59395- FR, 23 p., 18 fig., 1 DVD
- Krien Y., Garcin M., Pedreros R., Le Cozannet G. (2010) – Méthodes pour l'évaluation à l'échelle nationale de l'emprise maximale de l'aléa submersion marine. Rapport BRGM/RP-58101-Fr, 85 p, 28 fig., 5 tab
- Lecacheux S., Bulteau T., Pedreros R., Delvallée E., Paris F. (2012). Projet ARAI 3 : Evaluation probabiliste des houles et des surcotes cycloniques en Polynésie Française. Rapport BRGM/RP-61888-FR, 120 p., 115 fig., 2 ann.
- MEEDDM (2010) La gestion du trait de côte - Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de la Mer 290 p. QUAE Ed. Versailles
- Miruma N. (1999) – Vulnerability of island countries in the South Pacific to sea level rise and climate change. *Climate Reseach*, 12, 137-143
- Observatoire de la Côte Aquitaine <http://littoral.aquitaine.fr/>
- Paskoff R. (1985) - Les littoraux : impact des aménagements sur leur évolution, Masson, 188 p., 99 fig., 20 photos, Paris,
- Pedreros R. & Garcin M. (2012) – Le phénomène de la submersion marine in « *Gestion des risques naturels, Leçons de la tempête Xynthia* » p. 47-56 Ed. QUAE Versailles
- Pedreros R., Garcin M., Krien Y, Monfort Climent D., Mugica J., François B. (2010) - Tempête Xynthia : compte rendu de mission préliminaire. Rapport BRGM/RP-58261-FR, 45 p., 31 fig.
- Porcher M. (1995) – Protection du Littoral en milieu lagunaire. Ministère de l'Environnement Ed., Papeete

Koffler A., Zengerink E., Ascione J-C., Birukoff J-M. (2009) – Un atténuateur de houles en tube géosynthétique pour limiter l'érosion de la plage de la Capte à Hyères. *Rencontres Géosynthétiques 2009*

Sanquer R. (2009) – Techniques de protection contre la submersion marine – Rapport CETMEF 2009



**Centre scientifique et technique**  
**Direction Risques et Prévention**  
3, avenue Claude-Guillemin  
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34